

Kerstin Hecht

**Entwicklung eines Laserstrahlpolierverfahrens
für Quarzglasoberflächen**

Werkstofftechnik Aktuell

Schriftenreihe aus dem Fakultätsübergreifenden Institut für
Werkstofftechnik (IWT) an der TU Ilmenau

Herausgegeben von Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Peter Schaaf
und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Edda Rädlein

Band 8

Die vorliegende Schriftenreihe "Werkstofftechnik Aktuell" berichtet über aktuelle Forschungsergebnisse aus dem Institut für Werkstofftechnik (IWT) der TU Ilmenau. Die ausgewählten Texte spiegeln die breit gefächerten materialwissenschaftlichen und werkstofftechnischen Themen, die am IWT bearbeitet werden, wieder. Für weitere Informationen und Rückfragen können Sie sich gerne an das Institut (www.tu-ilmenau.de/wt) wenden oder das Institut persönlich besuchen. Über Ihre Anregungen, konstruktive Kritik und Ihre Kontaktaufnahme würden wir uns sehr freuen. Das IWT steht wissenschaftlichen Zusammenarbeiten stets aufgeschlossen gegenüber.

Entwicklung eines Laserstrahlpolierverfahrens für Quarzglasoberflächen

Kerstin Hecht



Universitätsverlag Ilmenau
2012

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 27. Februar 2012

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. oec. Dagmar Hülsenberg
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens Bliedtner
(Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena)

3. Gutachter: Dr.-Ing. Hartmut Müller
(Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung,
Jena)

Tag der Verteidigung: 4. Juli 2012

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISSN 1868-6532 (Druckausgabe)

ISBN 978-3-86360-041-9 (Druckausgabe)

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012000220

Kurzzusammenfassung

Das Ziel der Laserstrahlpolitur (LSP) ist die gleichmäßige und formerhaltende Glättung des Rauheitsprofils einer Quarzglasoberfläche in kürzester Zeit. Die Laserstrahlung wirkt dabei unabhängig von der Geometrie der zu polierenden Oberfläche in der Art eines schnellen Subaperturwerkzeuges. Die Untersuchungen der Prozesseinflussgrößen, der Wechselwirkungen zwischen Laserstrahlung und Quarzglas sowie die Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich Oberflächenqualität, der Beeinflussung von Spannungen und mechanischen Eigenschaften, unterstützen die Entwicklung eines industriell einsetzbaren Laserstrahlpolierverfahrens.

An die Einführung schließen sich Darstellungen zum Verständnis wichtiger Grundlagen an. Darin enthalten sind das Funktionsprinzip der LSP, Aufbau und Eigenschaften der verwendeten Laseranlagen sowie Werkstoffeigenschaften und prozessrelevantes Verhalten des verwendeten Quarzglases. Eine Simulation der LSP sowie Betrachtungen zu Viskosität, Oberflächenspannung und Materialabtrag runden diese ab.

Im Hauptteil der Untersuchungen werden Proben unterschiedlich spanend vorbearbeitet und mittels Laserstrahlung poliert. Die Planung, Durchführung und Auswertung der Experimente erfolgt unter Anwendung statistischer Methoden. Diese zeigen u. a., dass für die Laserstrahlpolitur die Leistung und ihre Einwirkdauer von größter Bedeutung sind. Die Temperatur, als wichtigste Einflussgröße des Prozesses, wird während der Politur punkt- bzw. linienförmig mittels Pyrometer und z. T. mittels Wärmebildkamera überwacht. In einem Temperaturbereich von 1900...2100 °C wird eine Politur ohne signifikanten Materialabtrag erreicht. Messungen am Tastschnittmessgerät (2D und 3D) zeigen, dass die Oberflächenausgangsrauheit R_a von 0,1...0,4 µm durch die LSP auf 4...10 nm reduziert werden kann. Zur Bewertung der Oberflächen werden AFM-, REM- und EDX-Analysen, Härte- und

Biegebruchfestigkeitsuntersuchungen sowie Spannungsmessungen durchgeführt. Es zeigt sich u. a., dass die LSP die Form der Oberflächen nicht verändert aber ein geeigneter Kühlprozess zum Spannungsabbau notwendig sein kann. Im Gegensatz zur mechanischen Vergleichspolitur mit einer Polierrate von 228 s/cm^2 können Quarzglasoberflächen jetzt in $4,8 \text{ s/cm}^2$ bearbeitet werden.

Zur Erweiterung der Anwendungsbreite der LSP wird zusätzlich ein Piezo-Scanner entwickelt, gefertigt und in den Testbetrieb überführt, der die Politur von $2\frac{1}{2}\text{D}$ -Konturen auf Quarzglasoberflächen ermöglicht.

Die Arbeit schließt mit Applikationsbeispielen ab, die u.a. eine erfolgreiche Fertigung und LSP von Werkzeugformeinsätzen zum Kunststoffspritzgießen für ein industrienahes Forschungsprojekt enthalten.

Die Einsatzgebiete des Verfahrens liegen insbesondere beim Polieren von 2D- und $2\frac{1}{2}\text{D}$ -Bauteilen, Werkzeugformeinsätzen für die Kunststoffverarbeitung und auch in Teilbereichen optischer Komponenten.

Abstract

The aim of laser beam polishing is to achieve an even surface finish in shortest possible time without changing the contour. Laser radiation acts as a topology-independent subaperture tool. The analyses of the influences towards the process, the interaction between laser radiation and fused silica as well as a comprehensive evaluation of the results concerning surface quality, manipulation of tensions and mechanical properties support the development of an industrial applicable laser polishing technology.

All necessary basics are presented subsequent to the introduction. These include the general principle of laser beam polishing, the structure and properties of the applied laser systems as well as material properties and relevant material behavior of fused silica. A simulation of the laser beam polishing process as well as views on viscosity, surface tension and stock removal complete the fundamentals.

Throughout the main part of the research working samples are pre-machined using several cutting technologies and then polished with laser radiation. The design, execution and evaluation of the experiments are carried out by means of statistic methods. These show that power and dwell time are the most significant factors for laser beam polishing. Temperature, as one of the most important parameters, is measured punctual or linear by pyrometer and 2-dimensional by infrared camera. In a temperature range from 1900...2100 °C a polishing process without stock removal is achieved. Measurements on a stylus instrument (2D and 3D) show, that laser beam polishing can reduce the initial roughness R_a from 0.1 ... 0.4 μm down to 4 ... 10 nm. The surfaces of the samples were observed by AFM-, SEM- and EDX-methods, hardness and bending strength analyses as well as tension gauge. Among other things it is indicated, that the laser beam polishing technology does not change the surface contour however a suitable cooling process to reduce tensions may be necessary. In con-

trast to the comparative mechanical finishing with a polishing rate of 228 s/cm^2 it is now possible to polish fused silica surfaces with $4,8 \text{ s/cm}^2$ by polishing with laser radiation.

To extend the range of application of the laser beam polishing technology a piezo-scanner is brought from development via manufacturing up to testing, henceforth allowing a finish of $2\frac{1}{2}\text{D}$ -contours on fused silica surfaces.

The graduate thesis ends with application examples, such as the successful grinding and laser beam polishing of injection mold inserts to process polymers for an industry-oriented research project. Further fields of application of this technology are polishing of 2D- and $2\frac{1}{2}\text{D}$ -parts, mold inserts for plastics processing and also particular areas of optical components.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	5
Abstract	7
Inhaltsverzeichnis	9
Verzeichnis verwendeter Symbole und Abkürzungen	13
1 Einleitung	17
2 Ziel und Vorgehensweise	19
3 Grundlagen	21
3.1 Überblick	21
3.2 CO ₂ -Laser und CO ₂ -Laserstrahlung	22
3.2.1 Funktionsprinzip	22
3.2.2 Aufbau und Funktion der verwendeten Laseranlagen.....	24
3.2.3 Eigenschaften der verwendeten CO ₂ -Laser	27
3.2.4 Wechselwirkung Laserstrahl - Werkstoff.....	33
3.3 Quarzglas – Werkstoffeigenschaften und prozessrelevantes Verhalten	37
3.4 Temperaturerfassung – Methoden, Messgeräte, Einsatzkriterien	41
3.4.1 Prinzip der berührungslosen Temperaturmessung am Beispiel Pyrometer	41
3.4.2 Flächenhafte Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera	45
3.4.3 Zur Temperaturmessung verwendete Geräte	46
3.5 Mechanisches Polieren von Glasoberflächen.....	47
3.5.1 Beschreibung des Verfahrens	47
3.5.2 Definition einer polierfähigen Oberfläche	49
3.5.3 Mechanische Vergleichs-Politur.....	50
3.6 Laserstrahlpolierprozess – Ausgangsbedingungen und Modellbeschreibung.....	51

3.6.1	Funktionsprinzip.....	51
3.6.2	Simulation der Laserstrahlpolitur	53
3.6.3	Thermische Nachbehandlung (Kühlkurve) der Proben nach der LSP.....	57
3.6.4	Einfluss von Viskosität und Oberflächenspannung	59
3.6.5	Betrachtungen zum Materialabtrag durch die Laserstrahlpolitur	61
4	Laserstrahlpolieren – experimenteller Aufbau	64
4.1	Anforderungen an den experimentellen Aufbau.....	64
4.2	CO ₂ -Laser mit Galvo-Scannersystem	66
4.2.1	Aufbau der Versuchsanlage.....	66
4.2.2	Scankonzepte – Strahlführung auf der Quarzglasoberfläche	67
4.2.3	Ermittlung relevanter Laserstrahlparameter	71
4.3	CO ₂ -Laser mit neu entwickeltem Piezo- Scannersystem.....	72
4.3.1	Aufgabenstellung für Piezo-Scannersystem.....	72
4.3.2	Spezielle Systemanforderungen	73
4.3.3	Auswahl, Entwicklung und FEM-Analyse des Piezoscansystems.....	74
4.3.4	Umsetzung und Erprobung des neuen Scannersystems.....	78
5	Experimente	80
5.1	Ablauf der Experimente.....	80
5.2	Probenvorbereitung durch Läppen	81
5.3	Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide	82
5.3.1	Begründung der Vorbearbeitung durch Schleifen	82
5.3.2	Statistische Versuchsplanung	83
5.3.3	Schleifen ebener Proben - Ergebnisse	85
5.3.4	Form- und Profilschleifen von 2½D Konturen und Makrostrukturen.....	96
5.4	Laserstrahlpolieren.....	99

5.4.1	Erprobung und Optimierung der Temperaturerfassung	99
5.4.2	Versuchsplanung für das Laserstrahlpolieren	107
5.4.3	Ergebnis der Laserstrahlpolitur in den Probengruppen A, B und C	109
5.4.4	Optimierung der Laserstrahlpolitur für Gruppe C.....	119
5.4.5	Nomogramme – kombinierter Einfluss von Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit	124
6	Weitere Untersuchungen polierter Proben und Diskussion der Ergebnisse.....	126
6.1	Begründung für weitere Messungen an den Oberflächen.	126
6.2	Zusammenhang zwischen polierfähigen Oberflächen und Ergebnissen der LSP	127
6.3	Zusätzliche Charakterisierung und Bewertung der Oberflächen nach der LSP	129
6.3.1	Darstellung des Oberflächenprofils.....	129
6.3.2	Beeinflussung der Oberflächenqualität durch Fremdstoffe.....	138
6.3.3	Materialspannungen	142
6.4	Einfluss der LSP auf mechanische Eigenschaften der Quarzglasproben	146
6.4.1	Begründung der Untersuchungen.....	146
6.4.2	Oberflächenhärte.....	146
6.4.3	Biegebruchfestigkeit	148
6.5	Temperaturverteilungsanalyse	151
6.5.1	Zielstellung des Vergleichs der angewendeten Temperaturmessverfahren.....	151
6.5.2	Punkt- und linienförmige Temperaturmessung.....	151
6.5.3	Flächenhafte Temperaturmessung.....	153
6.5.4	Rückschlüsse von den Ergebnissen der Kameramessung auf die Pyrometrie	155

6.5.5	Möglichkeit eines temperaturgesteuerten Laserpolierprozesses	162
7	Verfahrensmodell.....	164
7.1	Prozessmodell und Einflussgrößen – erreichbare Qualität und Grenzen.....	164
7.2	Vergleich des Laserstrahlpolierens mit anderen Polierv Verfahren	167
8	Ausgewählte Applikationen.....	169
8.1	Prozesskette Linsenarray.....	169
8.2	Prozesskette Spritzgusswerkzeug-Formeinsatz	170
8.2.1	Test mit Probegeometrie aus Schleifuntersuchungen	170
8.2.2	Formeinsatz zum Spritzgießen von MID aus CNT-haltigen Polymerblends.....	172
8.3	LSP mit neu entwickeltem Piezoscanner.....	176
8.3.1	Untersuchungen auf ebenen Oberflächen	176
8.3.2	Laserstrahlpolitur von Prismen.....	180
9	Zusammenfassung	182
10	Quellenverzeichnis	186
10.1	Literatur	186
10.2	Betreute Arbeiten	191
11	Verzeichnis der Abbildungen.....	192
12	Verzeichnis der Tabellen.....	198

Verzeichnis verwendeter Symbole und Abkürzungen

A	Absorptionsgrad	
a	Abstand (im $[\text{SiO}_4]^{4-}$ -Tetraeder)	[pm]
a_e	Arbeitseingriff oder Eingriffsbreite (Schleifen)	[mm]
$a_{e\text{-vor}}$	Eingriffsbreite beim Vorschleifen	[mm]
A_F	Fläche	$[\text{mm}^3]$
AFM	Atomic-Force-Microscope	
a_p	Schnittbreite	[mm]
a_{pyro}	Messabstand des Pyrometers	[mm]
A_{Strahl}	Querschnittsfläche Laserstrahl auf Probenoberfläche	$[\text{mm}^2]$
$A_{\text{ÜF}}$	Fläche der Laserstrahlüberlagerung	$[\text{mm}^2]$
b	Bogenlänge	[mm]
$B = r^2$	Bestimmtheitsmaß	
BSE	back scattered electrons	
BZ	Bearbeitungszeit	[min], [h]
c	Lichtgeschwindigkeit	[m/s]
c_m	Spezifische Wärmekapazität	$[\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}]$
C_p	Polierkonstante	$[10^{-7} \text{ cm}^2/\text{N}]$
d	Dicke	[mm]
d_f	Durchmesser des Laserstrahles	[mm]
DIK	Differentieller-Interferenz-Kontrast	
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie	
f	Frequenz	[Hz]
f_b	Brennweite	[mm]
F	Fokussierkennzahl	
h_d	Kreissegmenthöhe	[mm]

HSQ300	Herstellernamen des verwendeten Quarzglases	
I	Intensität	[W/mm ²]
K	Strahlpropagationsfaktor	
k	Absorptionsindex	
l	Linienabstand	[μm]
l_{α}	Absorptionslänge	[mm]
l_R	Resonatorlänge	[m]
LSP	Laserstrahlpolitur	
$M, M_s, M_{\lambda s}$	Spezifische und Spektrale Spezifische Ausstrahlung	[W/m ²]
M^2	Beugungsmaßzahl	
MA	Materialabtrag	[mg]
M_{TV}	Gesamtvergrößerung eines Mikroskops	
n	Brechungsindex	
NA	Objektseitige Apertur	
n_g	Spindeldrehzahl (Schleifen)	[min ⁻¹]
OM 100	Herstellernamen des mikroporösen Quarzglases der Unterlage	
OPD	Optische Weglängendifferenz	[nm/cm]
p	Polierdruck	[N/mm ²]
p_D	Sättigungsdampfdruck	[mbar]
P	Laserleistung	[W], [%]
P_0	Leistung der Strahlung	[W]
P_{abs}	absorbierte / egekoppelte Leistung	[W]
P_R	reflektierte Leistung	[W]
P_T	transmittierte Leistung	[W]
PRESS	Predicted-Residual-Sum-of-Squares	
Pyro	Pyrometer	

Q	Wärmemenge	[J]
r	Kreisradius	[mm]
R	Reflexionsgrad/Reflektivität	
Ra	Arithmetischer Mittenrauwert	
REM	Rasterelektronenmikroskop	
RMSE	Root-Mean-Squared-Error	
Rq	Quadratischer Mittenrauwert	
$r_{Si^{4+}}; r_{O^{2-}}$	Ionenradius Silizium und Sauerstoff	[pm]
s	Sehnenlänge	[mm]
SE	Sekundärelektronen	
T	Temperatur	[°C]
t	Zeit	[s]
TCam	Thermografie- oder Wärmebildkamera	
t_p	Polierzeit	[s]
T_{trans}	Transmissionsgrad	
T_{VIS}	Visuell empfundene Schärfentiefe	[μ m]
t_w	Wartezeit der Piezosteuerung	[s]
TWB	Temperaturwechselbeständigkeit	
U	Kreisumfang	[mm]
ÜG	Grad der Überlagerung	[%]
V	Volumen	[m ³]
v_c	Schnittgeschwindigkeit	[mm/min]
v_f	Vorschubgeschwindigkeit	
	Schleifen	[m/min]
	Laserstrahlpolieren	[mm/min]
v_{fp}	Vorschubgeschwindigkeit (Pyrometer)	[mm/min]
v_s	Scangeschwindigkeit	[mm/s]
v_{SCA}	Geschwindigkeit des Pyrometerscanners	[mm/s]

W	Strahlungsenergie	[J]
w	Strahlradius	[mm]
$2w_0$	Strahltaillendurchmesser (Rohstrahl)	[mm]
w_f	Strahlradius im Fokus	[mm]
WEZ	Wärmeeinflusszone	
Wq	Welligkeit entsprechend R_q	[μm]
x	Kantenlänge der Quarzglasproben	[mm]
x_f	Vorschubweg	[mm]
y_s	Scanweg	[mm]
z	Fokusslage	[mm]
z_p	Abtragtiefe	[mm]
z_R	RAYLEIGH-Länge	[mm]
α	Linearer Ausdehnungskoeffizient	[K ⁻¹]
α_{abs}	Linearer Absorptionskoeffizient	[cm ⁻¹]
β	Absorptionskoeffizient	[μm^{-1}]
δ_{opt}	Optische Eindringtiefe	[μm]
ε	Emissionsgrad	
η	Viskosität	[Pa·s]
Θ	Divergenzwinkel	[mrad]
λ	Wellenlänge	[nm], [μm]
ϱ	Dichte	[g/cm ³]
σ	Oberflächenspannung	[N/mm ²]
σ_{bB}	Biegebruchfestigkeit	[N/mm ²]
σ_{SBK}	Stefan-Boltzmann-Konstante	[W/m ² K ⁴]

1 Einleitung

Die fortschreitende Entwicklung auf dem Gebiet der Lasermaterialbearbeitung führt dazu, die Vorteile dieser Technik in immer neuen Bereichen der Fertigung anzuwenden. Die vorliegende Arbeit hat daher die Entwicklung eines neuartigen Laserstrahlpolierprozesses zur Bearbeitung von Quarzglasoberflächen zum Inhalt.

Der Laserstrahl als Werkzeug besitzt einige wesentliche Vorteile. So ist er masselos, wodurch die Bearbeitung der Quarzglasoberflächen kraftlos erfolgt. Weiterhin ist er ein verschleißfreies, in seinen Parametern gut und schnell steuerbares Werkzeug, das seine Eigenschaften ständig selbst reproduziert. Welche speziellen Anforderungen an sein Bearbeitungsumfeld für die Laserstrahlpolitur (LSP) gestellt werden wird in der Arbeit untersucht. Weiterhin ist der Laser ein extrem flexibles und – in Verbindung mit einem Scanner – ein sehr schnelles Werkzeug, welches sich durch eine hohe Zugänglichkeit auf den zu bearbeitenden Oberflächen auszeichnet. Lediglich die lokal begrenzte Wärmeeinflusszone, die bspw. bei Metallen einen Vorteil darstellt, erweist sich in der Glasbearbeitung (speziell von Oberflächen) als Nachteil. Sie führt rasch zu thermischen Spannungen und im Extremfall zur Zerstörung des Materials.

Die klassische mechanische und z. T. manuelle Politur von Glasoberflächen ist einer ganzen Reihe von Restriktionen unterworfen. Polierfähige Oberflächen müssen schon zu einem hohen Grad vorbearbeitet sein, damit eine Politur wirtschaftlich möglich ist. Weiterhin wird bei den herkömmlichen Methoden die minimale Strukturgröße, die poliert werden kann, auf Grund der Werkzeuggeometrie und vor allem -größe begrenzt.

Die Laserstrahlpolitur wird nach dem gegenwärtigen Stand der Technik vor allem für metallische Oberflächen angewendet. Dabei reicht der Einsatz von der Verbesserung und Aufbereitung von metallischen Spritzgussformen über Anwendungen in der

Medizintechnik (Schutz vor Bakterienanhaftung) bis hin zum Verschließen poröser Oberflächen in der MIM-Technologie (Metall-Injection-Molding) [Popr05]. Diese Polierverfahren werden in gegenwärtigen Forschungsprojekten (z. B. [ILT07]) auch hinsichtlich ihrer Automatisierbarkeit untersucht und weiterentwickelt. In Verbindung mit 5-Achs-CNC-Bearbeitungsmaschinen sollen sie auch auf dreidimensionalen Oberflächen angewendet werden. Die bisher erreichten Rauheitswerte liegen bei $R_q = 230 \text{ nm}$, und die Oberflächen weisen eine Rillenstruktur auf, die aus dem zeilenförmigen Scannen resultiert. Untersuchungen, Glasoberflächen mittels Laserstrahlung zu polieren, stehen noch am Anfang und wurden bisher nicht hinreichend untersucht. Das Projekt InProGlas [LZH05] untersuchte die Laserstrahlpolitur von asphärischen Linsen (aus BK7) mittels CO_2 -Laser, wobei ein großer Teil der Forschung einem Mikrowellenofen zur Vorwärmung der Glasproben gewidmet war. Zur Laserstrahlpolitur mussten die Proben aufwendig in eine spezielle Aufnahme eingebettet werden. Während der Politur wurden die Linsen (stillstehend oder rotierend) mittels einer Translationsachse unter dem Laserstrahl verfahren. Im Ergebnis wurde das spiralförmige Polieren dem zeilenförmig scannenden vorgezogen, wobei die Linsenmitte so nicht poliert werden konnte. Die erreichbare Oberflächenrauheit wird mit $55 \text{ nm} < R_a < 92 \text{ nm}$ angegeben.

2 Ziel und Vorgehensweise

Im Rahmen der Arbeit erfolgen Untersuchungen zu einem neuen Polierverfahren, um einerseits wissenschaftliche Erkenntnisse über das Verhalten von Quarzglasoberflächen unter dem Einfluss von CO₂-Laserstrahlung zu gewinnen und um andererseits diese Ergebnisse in die praktische Anwendung umzusetzen. Es wird untersucht, in wie weit es möglich ist, die Oberflächen zu polieren, ohne die stoffliche Struktur des Quarzglases nachhaltig zu verändern. Auch werden die Möglichkeiten des Verfahrens zur gezielten Beeinflussung der Mikro- und Makrotopographie ermittelt. Darüber hinaus eröffnet sich durch die angestrebte Subapertur-Politur ein völlig neues Anwendungsgebiet der Laserstrahlung für die Bearbeitung von Mikrogeometrien.

Durch den Einsatz des Lasers als neuartiges Polierwerkzeug wird eine enorme Zeitersparnis bei der Oberflächenbearbeitung von Quarzglas erwartet. Damit bekommt der Prozess eine große Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit spezieller Polieraufgaben und -anforderungen.

Um das neue Laserstrahlpolierverfahren so weit zu entwickeln, dass es als industriereif anzusehen ist, werden in der vorliegenden Arbeit entsprechende Hypothesen zur Wechselwirkung der CO₂-Laserstrahlung mit Quarzglas entwickelt und überprüft. Darüber hinaus erfolgen Untersuchungen zur Vorbearbeitung der Quarzglasproben, Temperaturmessung, Prozesskontrolle und -optimierung sowie die Erarbeitung und Vorstellung ausgewählter Applikationen. Dafür kommen unterschiedliche CO₂-Laseranlagen sowie ein kommerzielles und ein eigenentwickeltes Scansystem zum Einsatz. Die Prozessentwicklung und -optimierung wird sowohl durch Temperaturerfassung mittels Pyrometer und Wärmebildkamera als auch durch Oberflächenbewertung mit Hilfe mikroskopischer und spektroskopischer Verfahren unterstützt. Die werkstofftechnische Untersuchung reicht dabei von der taktilen Oberflächenanalyse und der Gravimetrie über Ste-

reo-, Atom- und Rasterkraftmikroskopie bis hin zu spannungsoptischen Verfahren und der Untersuchung mechanischer Eigenschaften.

In der Arbeit werden neben den innovativen Möglichkeiten der LSP auch deren Grenzen im Bereich der Aufschmelzung der Quarzglasoberfläche (Oberflächenrauheit), der Dreidimensionalität und des Aspektverhältnisses der polierbaren Konturen sowie der Homogenität der polierten Flächen aufgezeigt.

Abschließendes Ziel ist die Vorstellung eines Verfahrens zur optimierten Laserstrahlpolitur von ebenen und strukturierten Quarzglasoberflächen mit anwendungsorientierten Angaben zu Prozessparametern, Möglichkeiten und Grenzen. Die Anwendung eines selbst entwickelten, piezogetriebenen Scansystems soll dabei eine unkomplizierte Übernahme des Verfahrens in die industrielle Praxis ermöglichen.

3 Grundlagen

3.1 Überblick

In diesem Kapitel werden grundlegende Kenntnisse über die verwendeten CO₂-Laser, das Quarzglas, die Wechselwirkungen der Laserstrahlung mit dem Quarzglas, die Temperaturmessung und den Polierprozess zusammengefasst dargestellt. Im Vorfeld der Untersuchungen zur LSP von Quarzglasoberflächen wurde der CO₂-Laser als effektivstes Werkzeug ausgewählt.

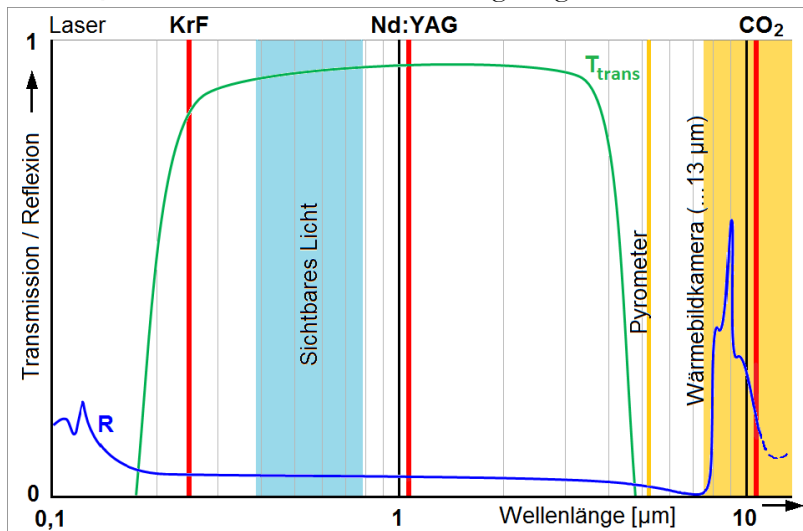


Abb. 3-1: Vereinfachte Darstellung der Transmission und Reflexion von Quarzglas

Aus Abb. 3-1 wird deutlich, dass die Wellenlänge dieses Lasers weit außerhalb des Transmissionsbereiches von Quarzglas liegt. Die Reflexion nimmt bei 10,6 µm – der CO₂-Laserwellenlänge – bereits wieder stark ab. Somit ist der Anteil der absorbierten Strahlung sehr hoch und damit die Voraussetzung für eine effektive Lasermaterialbearbeitung gegeben. Die Temperaturmessung erfolgt hauptsächlich mittels speziellem Glaspyrometer der Wellenlänge 5,14 µm. In diesem Bereich gibt es weder Transmission noch nennenswerte Refle-

xion, womit der Emissionsgrad bei 98 % liegt (vgl. 5.4.1). Das Spektrum der Wärmebildkamera, die eine flächige Temperaturanalyse ermöglicht, liegt außerhalb des Transmissionsbereiches von Quarzglas und enthält neben der CO_2 -Laserwellenlänge einen Wellenlängenbereich erhöhter Reflexion. Der Einsatz eines speziellen $9,9\text{ }\mu\text{m}$ Cut-off Filters schützt den Sensor der Kamera vor der Laserstrahlung. Details zu diesem Messverfahren finden sich im Abschnitt 3.4.2. Die Gegenüberstellung der Polierprozesse – klassisch mechanisch und mittels Laserstrahlung – in Abschnitt 3.5 und 3.6 verdeutlicht Prozessbedingungen, -voraussetzungen sowie generelle Vor- und Nachteile der beiden Verfahren.

3.2 CO_2 -Laser und CO_2 -Laserstrahlung

3.2.1 Funktionsprinzip

Das Lasermedium, welches im CO_2 -Laser durch Gasentladung angeregt wird, besteht aus einem Gasgemisch $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$. Das CO_2 -Molekül ist linear aufgebaut, das C-Atom liegt in der Mitte. Aus diesem Aufbau ergeben sich 3 mögliche Schwingungen, zu denen das Molekül angeregt werden kann (Abb. 3-2). Die Biegeschwingung $(0, 1, 0)$ hat die niedrigste Energie, die symmetrische Streckschwingung $(1, 0, 0)$ liegt energetisch darüber (Abb. 3-3), und die asymmetrische Streckschwingung $(0, 0, 1)$ bildet von diesen dreien das höchste Energieniveau. Dort finden die Stöße 2. Art mit den angeregten, metastabilen N_2 -Molekülen statt, die durch die Gasentladung entstehen und hauptsächlich zur Anregung des oberen CO_2 -Laserniveaus und damit zu Besetzungs-

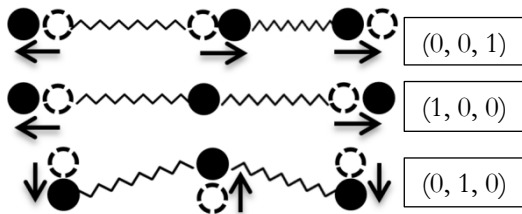


Abb. 3-2: Modell der Normalschwingungen des CO_2 -Moleküls [Baue91]

inversion und induzierter Emission führen. Beim Übergang des Systems von $(0, 0, 1)$ zu $(1, 0, 0)$ entsteht die charakteristische CO_2 -Laserstrahlung der Wellenlänge $10,6 \mu\text{m}$. Das He-Gas sorgt für eine schnellere Entleerung der unteren Energieniveaus, was zur Erzeugung des Dauerstrichbetriebes notwendig ist. Außerdem kann es auf Grund seiner guten Wärmeleitungseigenschaften die Verlustwärme des Lasergases abführen. [Stru09] [Eich06]

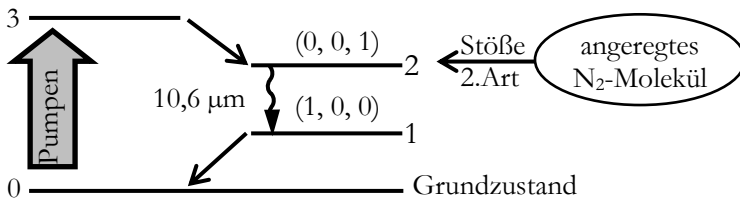


Abb. 3-3: vereinfachtes Modell des 4-Niveausystems des Kohlendioxidlasers

Um einen Laserstrahl für die Materialbearbeitung zu erhalten, muss die im aktiven Medium – dem Lasergas – erzeugte Strahlung durch Rückkopplung und kohärente Überlagerung im Resonator verstärkt werden. In den verwendeten CO_2 -Lasern werden Photonen vom angeregten, aktiven Medium, welches sich zwischen den Spiegeln des Resonators befindet, spontan emittiert. Sie bewegen sich zwischen den reflektierenden Resonatorspiegeln und erzeugen durch stimulierte Emission weitere Photonen, wodurch die Strahlung verstärkt wird. Ist diese Verstärkung entsprechend groß, kann lawinenartig eine kohärente elektromagnetische Welle entstehen, von der ein Teil am Auskoppelspiegel ($R < 1$) als Laserstrahlung den Resonator verlässt. Alle Resonatorparameter (Reflektivität R , Spiegelradien, Spiegeldurchmesser, Resonatorlänge l_R u.a.) beeinflussen die Eigenschaften der Laserstrahlung (Leistung, Divergenz, Polarisation, u.a.). [Baue91]

Die Ausgangsleistung ist proportional zur Resonatorlänge l_R und diese muss ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ($10,6 \mu\text{m}$)

betragen, damit sich eine stehende Welle ausbildet und so maximale Laserleistung erzeugt wird. Das wird durch entsprechende Justage der Resonatorspiegel erreicht.

Für die LSP wird die Betriebsart cw (continuous wave) – also der kontinuierliche oder Dauerstrichbetrieb – verwendet. Es ist wichtig, dass die Laserenergie gleichmäßig in die zu bearbeitende Oberfläche eingebracht wird. Dafür sind sowohl die kontinuierliche Zufuhr der Pumpenergie als auch konstante Resonatorparameter entscheidend.

CO₂-Laser gehören zu den wichtigsten Lasern für industrielle Anwendungen [Eich06]. In der Literatur wird ihr Gesamtwirkungsgrad, abhängig vom Typ, mit 5...20 % angegeben. [Stru09] [Eich06] [Popr05].

3.2.2 Aufbau und Funktion der verwendeten Laseranlagen

Für die Untersuchungen werden zwei unterschiedliche CO₂-Laseranlagen verwendet. Beide Bearbeitungsanlagen bestehen aus einem Portalsystem, auf das über Spiegel der Strahl des jeweiligen CO₂-Lasers eingekoppelt wird. Die theoretischen Maximalleistungen der Laser betragen 1,5 und 2 kW im verwendeten cw-Betrieb.

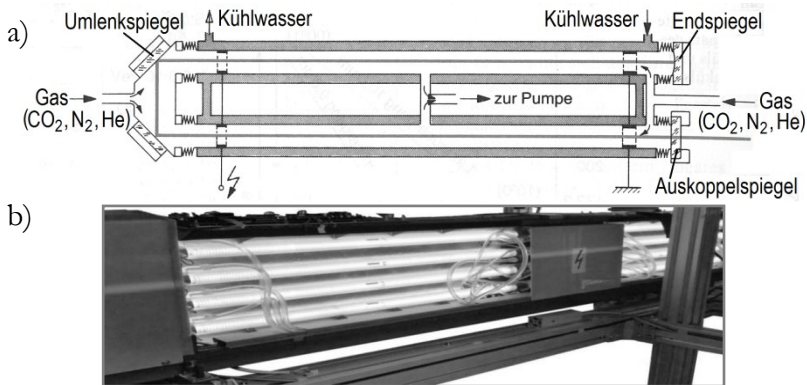


Abb. 3-4: Langsam längsgeströmter CO₂-Laser; a) Schema [Baue91], b) Foto

Der 1,5 kW SM1500P Laser der Firma FEHA GmbH (Abb. 3-4) ist ein gleichstromangeregtes System. Über Elektroden, die sich unmittelbar im Lasergas befinden, wird die elektrische Energie zur Gasentladung und damit zur Anregung des Lasermediums eingekoppelt. Durch diesen relativ einfachen und kostengünstigen Aufbau wird ein vergleichsweise hoher Gesamtwirkungsgrad erreicht. Das Gas strömt langsam längs zur optischen Resonatorachse in einem wassergekühlten Doppelglasrohr (Innendurchmesser 20 mm).

Die Zusammensetzung und Bereitstellung des Gasgemisches aus CO_2 , N_2 und He erfolgt über die Partialdrücke der Gase im Verhältnis 1:1:8. Moderne Systeme verwenden dagegen speziell konfektioniertes Premix-Gas (siehe CO_2 -Slab-Laser). Die Strömung aus der kontinuierlichen Gaszufuhr sorgt dafür, dass aus der Entladung resultierende Dissoziationsprodukte (wie CO und O_2) und die Verunreinigungen aus dem Elektrodenabbrand aus dem Resonator entfernt werden [Eich06]. Durch Anpassung der Strömungsgeschwindigkeit, der Gaszusammensetzung, des Gasdruckes und der Anregungsenergie kann die Laserleistung verändert werden. Die Elektroden sind so platziert, dass die Anregung coaxial zur Strömung erfolgt. Die Wasserkühlung in der Wand des Doppelglasrohres sorgt für den Abtransport der Wärme. In der Literatur [Stru09], [Eich06] wird für diesen Lasertyp eine Maximalleistung von 80 W pro 1 m Entladungsstrecke angegeben. Der stabile Resonator im SM1500P hat eine Länge von 16,8 m, die durch eine 9-fach Faltung erreicht wird [Schm09]. Dieser Resonatortyp zeichnet sich durch einen gaußförmigen Grundmode und geringe Beugungsverluste aus. Mit den im Zeitraum der Untersuchungen verwendeten Einstellungen beträgt die Maximalleistung ca. 1400 W. Der Laser emittiert die Strahlung im Grundmode (TEM_{00}) mit einer sehr guten Strahlqualität von $K > 0,8$ laut Datenblatt. Die durchgeführte Strahlanalyse hat einen K-Wert von 0,92 im Fernfeld ergeben.

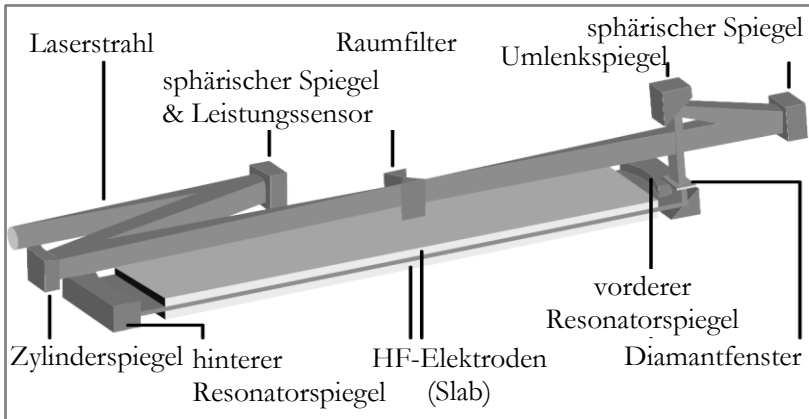


Abb. 3-5: Schema eines CO₂-Slab-Lasers [ROFI10]

Im 2 kW DC020 Laser der Rofin-Sinar Laser GmbH findet der oben genannte Elektrodenabbrand nicht statt, da in diesem System die zur Gasentladung erforderliche Energie kapazitiv eingekoppelt wird. Bei dieser Art der Anregung spricht man von einem hochfrequenzangeregten Laser. Durch die Modulation der Hochfrequenzleistung kann ein sehr weites Leistungsfeld erreicht werden. [Wirt04] Dieser sog. CO₂-Slab-Laser (Abb. 3-5) hat eine sehr kompakte Bauweise und einen extrem geringen Gasverbrauch gegenüber dem geströmten System. Die Hochfrequenzanregung erfolgt über parallel dicht übereinander angeordnete, wassergekühlte Kupferplattenelektroden, zwischen denen sich der Strahl ausbreitet. Die großflächige Anregung ermöglicht höhere Laserleistungen bis 10 kW. Das Gasgemisch ist in einer Gasflasche disponibel im System integriert und muss im Dauerbetrieb nur alle 24 h ausgetauscht werden, indem der Resonator zunächst evakuiert und anschließend mit dem neuen Gemisch geflutet wird. Die bei der Entladung entstehenden Dissoziationsprodukte CO und O₂ reagieren durch geringe Beimischungen von Wasserstoff wieder zu CO₂ [Stru09] und müssen deswegen nicht durch eine Gasströmung entfernt werden. Der instabile Resonator besteht aus zwei rotationsparabolisch geformten Spiegeln, zwischen

denen der Laserstrahl im Zick-Zack verläuft und so bis zum Auskoppeln verstärkt wird. Der asymmetrische Aufbau dieses Resonators führt zu einem Rechteckprofil des Strahls, welcher durch entsprechende Spiegel und Filter anschließend zu einem Gaußstrahl geformt wird. Dieser weist eine hohe Strahlqualität von $K > 0,9$ auf. [Stru09] [Wirt04]

3.2.3 Eigenschaften der verwendeten CO_2 -Laser

Die für die Anwendung der Laser in den Untersuchungen dieser Arbeit relevanten Eigenschaften und Parameter werden den zugehörigen Datenblättern entnommen und durch eigene Analysen ergänzt.

Die in Tabelle 3-1 zusammengefassten Werte betreffen unmittelbar den Laser bzw. den ausgekoppelten Strahl.

Tabelle 3-1: Technische Daten der Laser (Datenblätter)

			SM1500P	DC020
Maximalleistung (cw)	P	W	1500	2000
Stabilität (24 h)		%	62	62
Wellenlänge	λ	μm	10,6	10,6
Anregungsart			Gleichstrom	Hochfrequenz
Polarisation			linear	linear
Strahlpropagationsfaktor	K		$> 0,8$	$> 0,8$
Fernfelddivergenz des Laserstrahls (Vollwinkel)	θ	mrad	$< 1,5$	$< 0,42^*$
Strahl-Taillen-Durchmesser	$2w_0$	mm	ca. 13	ca. 12
Gasverbrauch		l/h	ca. 80	$< 0,3$
(*keine Angabe im Datenblatt, aus Ergebnissen der Rohstrahlanalyse berechnet)				

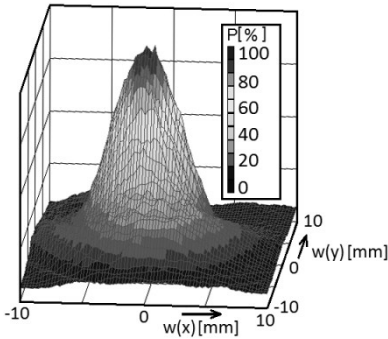


Abb. 3-6: Rohstrahlprofil des SM1500P bei 100% Leistung

Der TEM_{00} Grundmode, der die Strahlung beider Laser charakterisiert, weist eine besonders gleichmäßige Feld- bzw. Intensitätsverteilung auf.

$$I = I_{\max} \cdot e^{-2\left(\frac{r}{w(z)}\right)^2} \quad \text{Gl. 3-1}$$

Diese Gauß-Funktion der Intensität bedeutet, dass die Querschnittsfläche $\pi w^2(z)$ 86,5 % (aus $1/e^2$) der Gesamtleistung des Laserstrahls enthält. Dies

gilt nur unter der Bedingung, dass $w = w(x) = w(y)$ ist. Laserleistung und maximale Intensität sind durch

$$P = \left(\frac{\pi}{2}\right) w^2 I_{\max} \quad \text{Gl. 3-2}$$

miteinander verknüpft. Das 3D-Profil der Leistungsverteilung im Rohstrahl des SM1500P bei 100 % Leistung ist in Abb. 3-6 dargestellt.

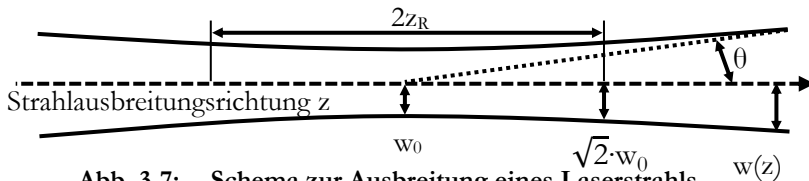


Abb. 3-7: Schema zur Ausbreitung eines Laserstrahls

Der Strahl ändert bei der Ausbreitung entlang der Strahlachse (in z-Richtung) seinen Durchmesser (Abb. 3-7), und es gilt

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_R^2}} \quad \text{Gl. 3-3}$$

$$\text{mit } w_0 = \sqrt{\frac{z_R \lambda}{\pi}} \quad \text{Gl. 3-4}$$

Der Taillenradius w_0 ist die Stelle entlang der Strahlausbreitungsrichtung, an welcher der Radius $w(z)$ minimal ist. Den Bereich in z -Richtung, in dem sich w_0 um das $\sqrt{2}$ -fache aufgeweitet hat, nennt man RAYLEIGH-Länge $z_R (= \pi \cdot w_0^2 / \lambda)$. Durch w_0 und z_R wird ein GAUßscher Strahl beschrieben. Die Aufweitung des Strahles außerhalb des hyperbolischen Verlaufs (nahe der Strahltaille) ist durch den Divergenzwinkel θ bestimmt. Dieser wird durch die Asymptote am Strahlverlauf in großen Abständen zur Strahltaille gebildet. Das sog. Strahlparameterprodukt $\theta \cdot 2w_0$ bleibt für jeden Laserstrahl konstant, da es allein von der Wellenlänge der Strahlung abhängig ist. Passiert der Strahl eine Optik und wird bspw. fokussiert, dann resultiert aus der nun kleineren Strahltaille ein größerer Divergenzwinkel. Der Strahlpropagationsfaktor K ist der Kehrwert der Beugungsmaßzahl M^2 , welche das Verhältnis des Strahlparameterproduktes des beurteilten Strahls zum Strahlparameterprodukt des theoretischen Grundmodestrahls gleicher Wellenlänge beschreibt. Anders ausgedrückt bestimmt das Strahlparameterprodukt das Fokussierverhalten und damit die Qualität des Laserstrahls für die Materialbearbeitung. [Eich06] [Stru09]

In den beiden verwendeten Anlagen führen mehrere optische Komponenten den Strahl nach Verlassen des Lasers zum eigentlichen Bearbeitungsort. Für diese Strahlführung kommen bei CO₂-Lasern hochreflektierende Spiegel zum Einsatz. Beim DC020 wird der Strahl nur durch einen goldbeschichteten $\lambda/4$ -Siliziumspiegel reflektiert, welcher ihn zirkular polarisiert. Danach passiert er die Fokussieroptik, eine 5“ Zinkselenidlinse.

Um die Daten in Tabelle 3-1 zu ergänzen, erfolgt an beiden Lasern eine Strahlanalyse. Für diese Analysen werden das Laserscope UFF 100 (Strahldaten) und das Lasermeter (Laserleistung) der Firma Prometec verwendet. Die Messmethode für die Strahlanalyse ist in [Prom98] beschrieben und basiert auf einem Prinzip, bei dem die Strahlung über einen sehr kleinen Spiegel ins Innere

einer Hohnadel reflektiert und von dort auf einen Sensor geleitet wird. Die Nadel rotiert mit hoher Geschwindigkeit und wird auf einer Linearachse durch den Strahl bewegt. Das Lasermeter absorbiert die einfallende Laserstrahlung vollständig und bestimmt ihre Leistung mit Hilfe eines kalorimetrischen Messverfahrens. [Prom00]

Die Analyse erfolgt sowohl für den Rohstrahl vor der Fokussieroptik als auch für den zur Bearbeitung verwendeten Laserstrahl nach der Optik. In Abb. 3-8 wird die Ausbreitung des Laserstrahles nach der Fokussieroptik dargestellt.

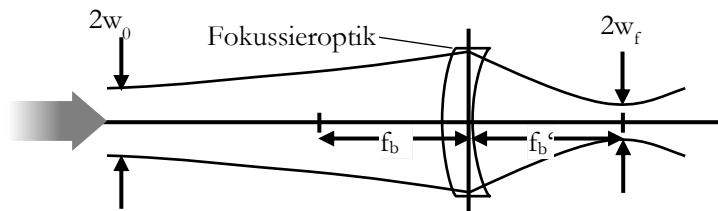


Abb. 3-8: Ausbreitung des Laserstrahls nach der Fokussieroptik (Schema)

Die Fokussierkennzahl F charakterisiert die Optik und ermöglicht die Bestimmung des minimalen Fokusbereichs [Blic05].

$$F = \frac{f_b}{2w_0} \quad \text{Gl. 3-5}$$

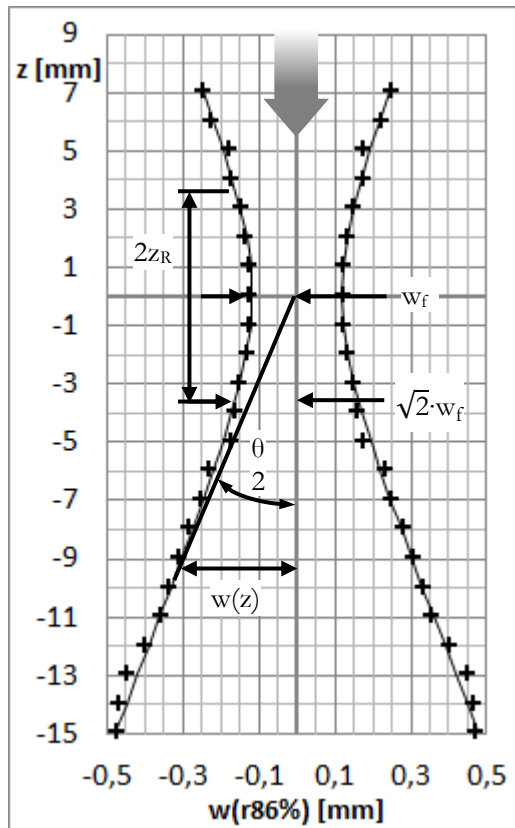
Bei fester Wellenlänge und Strahlqualitätszahl ergibt sich der minimale Fokusbereich

$$2w_f = \frac{2}{\pi} \cdot \lambda \cdot \frac{f_b}{w_0} = \frac{4}{\pi} \cdot \lambda \cdot F \quad \text{Gl. 3-6}$$

Für den SM1500P ergibt sich mit bekanntem Rohstrahldurchmesser $2w_0$ aus Tabelle 3-1 und der Brennweite der verwendeten Optik $f_b = 200$ mm der Wert für $2w_f$ zu 0,21 mm. Durch die Strahlanalyse konnte dies bestätigt werden (vgl. Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Daten der Laser aus Strahlanalyse

			SM1500P	DC020
Maximalleistung (cw) im Arbeitsbereich	P	W	1000	1900
RAYLEIGH-Länge*	z_R	mm	3,6	1,9
Taillenradius*	w_f	mm	0,115	0,09
Strahlpropagations-faktor*	K		0,92	0,83
Divergenz(voll)winkel*	θ	mrاد	64	92
Brennweite	f_b	mm	200	127
* ermittelt nach 86%-Methode				

**Abb. 3-9: Strahlkaustik des SM1500P nach Scanneroptik**

Die Form der Strahlkaustik eines Laserstrahls nach der Fokussieroptik gleicht einem Rotationshyperboloid. Abb. 3-9 zeigt eine 2D-Darstellung der Kaustik des SM1500P anhand $w(z)$ und Tabelle 3-2 die zugehörigen Strahldaten.

Die Software PROLAS ermöglicht in Verbindung mit dem Laserscope die Bestimmung der Strahlparameter z_R , K , M^2 und θ . Dafür werden das Strahlprofil bzw. der Strahlradius $w(z)$ in unterschiedlichen z -Positionen oberhalb, in und unterhalb der Fokusslage gemessen. Aus den Messwerten wird die in Abb. 3-9 dargestellte Fitkurve (Gl. 3-7) berechnet.

$$w(z) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{a \cdot z^2 + b \cdot z + c} \quad \text{Gl. 3-7}$$

Die Konstanten a , b , c werden ebenfalls von der Software ausgegeben:

$$a = 0,0041 \quad b = 0,02496 \text{ mm} \quad c = 0,09087 \text{ mm}^2$$

Die Berechnung aller Parameter basiert auf den Daten der Fitkurve. Das Minimum, also der Tailenradius w_0 , ist Basis zur Bestimmung von K , bzw. M^2 nach [Stru09].

$$K = \frac{2\lambda}{w_0 \cdot \Theta \cdot \pi} = \frac{1}{M^2} \quad \text{Gl. 3-8}$$

Der Divergenzwinkel θ wird an jeder z -Position außerhalb der doppelten Rayleigh-Länge bestimmt und anschließend gemittelt.

$$\theta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 2 \cdot \arctan \frac{w_i(z > 2z_R)}{z_i} \quad \text{Gl. 3-9}$$

Dabei werden die Daten der Fitkurve verwendet. Der ermittelte Strahlpropagationsfaktor $K = 0,92$ für den SM1500P beschreibt einen qualitativ hochwertigen Strahl, da dieser K -Wert maximal 1 sein kann. Der von der Software ausgegebene Wert für z_R (Tabelle 3-2) folgt aus der oben genannten Definition, wonach die RAYLEIGH-Länge den Bereich von $w(z) = w_f$ bis $w(z_R) = w_f \sqrt{2}$ umfasst. Bei bekanntem Radius w_f ergibt sich durch Umstellung

der Gleichung (Gl. 3-7) die quadratische Gleichung (Gl. 3-10) mit der Lösung (Gl. 3-11).

$$0 = z^2 + \frac{b}{a}z + \frac{c}{a} - \frac{8w_f^2}{a} \quad \text{Gl. 3-10}$$

$$z_{1,2} = -\frac{b}{2a} \pm \sqrt{\left(\frac{b}{2a}\right)^2 - \frac{c}{a} + \frac{8w_f^2}{a}} \quad \text{Gl. 3-11}$$

Aus der Hälfte des Abstandes zwischen z_1 und z_2 ergibt sich z_R rechnerisch zu

$$z_R = \frac{|z_1 - z_2|}{2} = 3,6 \text{ mm} \quad \text{Gl. 3-12}$$

Die Fokusslänge $2z_R$ für den SM1500P beträgt somit 7,2 mm. Der Divergenzwinkel und die Fitkurve spielen für die LSP eine entscheidende Rolle, da sie den Abstand zur Fokusslage und den Strahldurchmesser an dieser Stelle bestimmen. In Abschnitt 4.2.3 wird darauf näher eingegangen.

Die Daten für den DC020 wurden auf die gleiche Art und Weise ermittelt, wie die für den SM1500P. Die kürzere Brennweite führt zu einem kleineren Fokussdurchmesser und zu einer kürzeren RAYLEIGH-Länge. Die Konstanten a , b , c für die Fitkurve lauten

$$a = 0,00844 \quad b = -0,10405 \text{ mm} \quad c = 0,35195 \text{ mm}^2$$

und es ergibt sich nach Gl. 3-11 und Gl. 3-12 die RAYLEIGH-Länge $z_R = 1,9 \text{ mm}$. Die Angaben für K , M^2 und θ stehen ebenfalls in der Tabelle 3-2.

3.2.4 Wechselwirkung Laserstrahl - Werkstoff

Nach dem LAMBERT-BEERSchen-Gesetz gilt für die Absorption von Strahlung der Leistung P_0 in einem Medium an Luft, für die Leistung im Medium, in der Tiefe d :

$$P(d) = (P_0 - P_R)e^{-\alpha_{abs}d} \quad \text{Gl. 3-13}$$

P_R ist der reflektierte Teil der Leistung und α_{abs} der lineare Absorptionskoeffizient in cm^{-1} . Wenn nach Gl. 3-13 die eindringen-

de Strahlleistung ($P_0 - P_R$) auf den e-ten Teil abgefallen ist, gilt für die Absorptionslänge l_{α} :

$$l_{\alpha} = \frac{1}{\alpha_{abs}} \quad \text{Gl. 3-14}$$

Ist $l_{\alpha} \ll$ Werkstoffdicke, dann handelt es sich um Oberflächenabsorption. Aus Messungen der Reflexivität von Quarzglas für die Strahlung von $10,6 \mu\text{m}$ ergibt sich für die Reflexion $R(0^\circ) \approx 0,11$. [Stau98] Die Absorption A der Laserstrahlung im Material ist das Verhältnis aus eingekoppelter P_{abs} zu auftretender Leistung P . [Popr05]

$$A = \frac{P_{abs}}{P} \quad \text{Gl. 3-15}$$

P_{abs} kann durch Messung der auftretenden, transmittierten und reflektierten Leistung (P , P_T , P_R) bestimmt werden nach

$$P_{abs} = P - P_R - P_T \quad \text{Gl. 3-16}$$

Daraus folgt für A

$$A = 1 - R - T_{trans} \quad \text{Gl. 3-17}$$

Ist die Messung von P_{abs} nicht möglich, kann durch Vereinfachung auf den senkrechten Einfall der Strahlung der lineare Absorptionskoeffizient nach [Hüge92] wie folgt dargestellt werden

$$\alpha_{abs} = \frac{4 \cdot \pi \cdot n \cdot k}{\lambda} \quad \text{Gl. 3-18}$$

und ist damit von der Wellenlänge λ , dem Brechungsindex n und dem Absorptionsindex k des Quarzglases abhängig. Durch spezielle Messverfahren (beschrieben in [Henn97]) ist es möglich, diese Materialkonstanten numerisch zu ermitteln. Für hochreines Quarzglas¹ (bei $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) wurde $n = 1,97$ und $k = 0,037$ bestimmt. Damit ergibt sich nach Gl. 3-18 die Absorptionslänge aus

¹ Suprasil, hergestellt durch Flammenhydrolyse; Verunreinigungen: Na, Al, Ca, Ti je 0,05 ppm; Fe 0,02 ppm; Li, K, Cu je 0,01 ppm und Mg, Cr, Mn je 0,005 ppm; OH--Gehalt 800 ppm

Gl. 3-14 zu $l_\alpha = 11,5 \mu\text{m}$. Wurde das Material aus kristallinen SiO_2 -haltigen Rohstoffen erschmolzen und enthält mehr Verunreinigungen, ändern sich n und k . Nach [Stau98] und [Zolt70] verringert sich dann die Absorptionslänge auf etwa $5 \mu\text{m}$.

Da die CO_2 -Strahlung – wie beschrieben – nur einige μm tief in die Oberfläche eindringt, erfolgt durch die schnelle Absorption der Laserenergie eine rasche Erhöhung der Materialtemperatur. Wird diese Wärme nicht durch Wärmeleitung abgeführt, wird das Material zunächst aufgeschmolzen (z. B. bei Metallen) oder erweicht (z.B. bei Quarzglas) und – bei weiter ansteigender Temperatur – verdampft. Materialabtrag durch Sublimation tritt dann auf, wenn der Laserstrahl mit sehr hoher Intensität (z. B. durch starke Fokussierung) auf die Materialoberfläche trifft. So kann Quarzglas bspw. mittels CO_2 -Laser geschnitten und auch gezielt abgetragen werden. Voraussetzung ist dabei, dass das Material extrem schnell erwärmt wird, sodass nahezu keine Wärmeleitung stattfindet und sich keine flüssige Phase ausbildet. Materialien mit

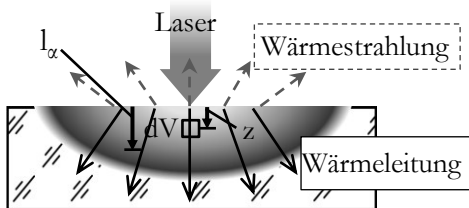


Abb. 3-10: Thermische Vorgänge am laserbestrahlten Quarzglas

einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit eignen sich daher besonders für das sog. Sublimationsschneiden. Bei der LSP soll dagegen vor allem ein Erweichen der Oberfläche stattfinden.

Die Abb. 3-10 zeigt schematisch die thermischen Vorgänge an einer laserbestrahlten Quarzglasoberfläche. Findet die Absorption der Energie im Quarzglas im Bereich der Absorptionslänge l_α statt, so ergibt sich für die Intensität der Laserstrahlung in der Tiefe z ($z < l_\alpha$) des Volumens dV nach dem LAMBERT-BEERSchen-Gesetz:

$$I(x, y, z, t) = I_0(x, y, t) \cdot (1 - R)e^{-\alpha_{abs} z} \quad \text{Gl. 3-19}$$

$I_0(x, y, t)$ ist die Intensität an der Materialoberfläche. Nach [Stau98] beträgt die Änderung der Intensität beim Durchgang durch das Volumen dV der Dicke dz

$$\frac{dI(x, y, z, t)}{dz} = -\alpha_{abs} \cdot I(x, y, z, t) \quad \text{Gl. 3-20}$$

Die Änderung ist negativ, da sich die Intensität I entlang z durch die Absorption verringert. Die im Volumen freigesetzte Wärmemenge $\dot{Q}(x, y, z, t)$ entspricht dieser Änderung

$$\begin{aligned} \left| \frac{dI(x, y, z, t)}{dz} \right| &= \frac{\dot{Q}(x, y, z, t)}{dV} \\ &= \alpha_{abs} \cdot I_0(x, y, t) \cdot (1 - R) e^{-\alpha_{abs} z} \end{aligned} \quad \text{Gl. 3-21}$$

Nach

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \rho \cdot dV \cdot c_m \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Gl. 3-22}$$

mit ρ (Materialdichte) und c_m (Spezifische Wärme des Materials) erzeugt die pro Zeiteinheit freigesetzte Wärmemenge aus Gl. 3-22 eine Temperaturänderung im Volumen dV . Aus der so erwärmten dünnen Oberflächenschicht erfolgt nach dem FOURIERSchen Gesetz die Wärmeleitung ins Materialinnere.

$$\dot{q} = -k \frac{\partial T}{\partial n_{ort}} = \frac{\dot{Q}}{dA_F} \quad \text{Gl. 3-23}$$

Die Energiestromdichte \dot{q} ist die Wärmemenge, die pro Zeiteinheit durch ein Flächenelement dA_F normal zur Wärmestromrichtung (Ortskoordinate n_{ort}) transportiert wird. Im vorliegenden Fall erfolgt die Wärmeleitung dreidimensional in ein Volumen der Größe $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$. Die dabei im Volumen verbleibende Wärme führt zur Erhöhung der inneren Energie U .

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \rho \cdot c_m (\Delta x \Delta y \Delta z) \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Gl. 3-24}$$

Durch die Entwicklung der Differentiale in Taylorreihen für alle 3 Raumrichtungen folgt die dreidimensionale Wärmeleitungsgleichung:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho \cdot c_m}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Gl. 3-25}$$

Dreidimensionale Wärmeleitungsgleichungen können nur unter Annahme bestimmter Randbedingungen und Voraussetzungen analytisch gelöst werden.

[Stau98]

Für die LSP erfolgt die Simulation von Temperaturverteilung und Materialspannungen in Kapitel 3.6.2.

3.3 Quarzglas – Werkstoffeigenschaften und prozessrelevantes Verhalten

Quarzglas oder Kieselglas hat aufgrund seiner besonderen Eigenschaften für eine Vielzahl von Anwendungsfeldern ein großes Einsatzpotenzial. Es besteht im Gegensatz zu anderen Glasarten nur aus einer Komponente, dem Siliziumdioxid (SiO_2). Glas ist, allgemein beschrieben, eine amorphe, ohne Kristallisation erstarrte, unterkühlte Schmelze. Einen periodischen Aufbau, in dem die Anordnung der Ionen einem Zustand maximaler Ordnung entspricht, wie bei Kristallen, gibt es nicht. Die Fernordnung fehlt im Glaszustand, in dem nur die Anordnung der Sauerstoffanionen um das Siliziumkation, die Nahordnung besteht. Glas erstarrt aus der Schmelze, wenn die Relaxations- und Umlagerungsprozesse der Ionen bzw. Moleküle zur Bildung von theoretisch möglichen Kristallen langsam oder eingeschränkt sind und so die geordnete Anlagerung an eventuell vorhandene Keime verhindert wird. In Silikatglasschmelzen steigt die Viskosität beim Abkühlen sehr stark an, und die Baugruppen aus $[\text{SiO}_4]^{4-}$ -Tetraedern (Abb. 3-11) zeigen eine große Tendenz zur Bildung dreidimensional verknüpfter, ungeordneter Netzwerke. Die Tetraeder entstehen

aufgrund des Ionenradienverhältnisses $r_{Si^{4+}}:r_{O^{2-}} \approx 0,3$ (aus Abb. 3-11) und aus der Regel, dass jedes Sauerstoffion an zwei Siliziumionen gebunden ist. Weiterhin entspricht die Tetraederanordnung den Bindungsverhältnissen, welche sich aus der Elektronentheorie ergeben.

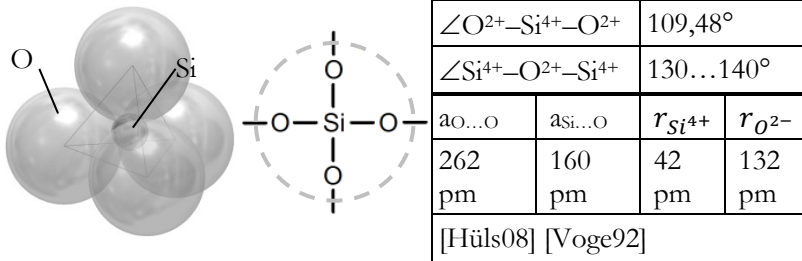


Abb. 3-11: Struktur und Bindung des $[SiO_4]^{4-}$ -Tetraeders

Das Silizium bildet durch Hybridisierung einen sp^3 -Hybrid mit vier gerichteten Bindungen in Form eines Tetraeders. [Scho88] Die chemische Bindung zwischen Sauerstoff (O^{2-} -Anion) und Silizium (Si^{4+} -Kation) im $[SiO_4]^{4-}$ -Tetraeder kann in polarer (d.h. ionischer bzw. heteropolarer), kovalenter oder Doppelbindungsform vorliegen. Es wird angenommen, dass eine Mischbindung vorliegt [Voge92]. Der Glaszustand ist metastabil und versucht, in den stabilen, energieärmeren kristallinen Zustand überzugehen. Deshalb kristallisieren Gläser bei längerem Tempern bei Temperaturen unterhalb ihres Erweichungspunktes aber oberhalb der Transformationstemperatur.

Quarzglas zeichnet sich besonders durch seine hohe Transmissi-
on (UV- bis zum mittleren IR-Bereich), seine geringe Wärmeausdehnung und Wärmeleitfähigkeit (verglichen mit metallischen Werkstoffen) sowie durch seine hohe Härte und chemische Beständigkeit aus. Jede dieser und weiterer Eigenschaften variiert allerdings je nach Ausgangsmaterial, Herstellungsart, Grad der Verunreinigung und Temperatur. In Tabelle 3-3 sind die relevan-

ten Eigenschaften des zur LSP ausschließlich verwendeten Quarzglas HSQ300 der Firma Heraeus zusammengefasst.

Tabelle 3-3: Ausgewählte Eigenschaften von HSQ300 [Hera09]

Eigenschaft						Einheit		Wert	
Dichte						g/cm³		2,203	
OH- - Gehalt						ppm		30	
Temp. am Erweichungspkt. ($\eta = 10^{7,6}$; η [dPas])						°C		1710	
Wärmeleitfähigkeit (20...950 °C)						W/m · K		1,38 - 2,68	
Mittlerer Ausdehnungskoeffizient		0...600 °C				K ⁻¹		5,4 · 10 ⁻⁷	
		0...900 °C				K ⁻¹		4,8 · 10 ⁻⁷	
Mohs-Härte								5,5 – 6,5	
Mikro-Härte						N/mm²		8600 – 9800	
Verunreinigung (in ionischer Form)	Element	Al	Ti	Li	Zr	Ca	K	Na	Fe
	ppm	15	1,1	0,6	0,7	0,5	0,4	0,3	0,1

Der OH-Gruppenanteil resultiert aus dem Herstellungsverfahren und beeinflusst im Quarzglas vorwiegend die IR-Transmission, die Gebrauchstemperatur sowie die Viskosität, wobei mit steigendem OH-Gehalt die Erweichungstemperaturen sinken. Das wird beim Vergleich von SQ (Firma SICO) mit einem OH-Gehalt von ca. 1200 ppm und einem Erweichungspunkt von 1580 °C [Sico09] mit HSQ300 (OH-Gehalt 30 ppm; Erweichungspunkt 1710 °C) besonders deutlich. Weil das in den Untersuchungen verwendete elektrisch geschmolzene Quarzglas durch Aufschmelzen von sehr reinem, natürlichem Quarz unter Vakuum oder in einer trockenen Atmosphäre hergestellt wird, weist es den niedrigsten Anteil an Hydroxylgruppen auf (30 ppm). Flammgeschmolzenes Quarzglas zeigt eine deutlich höhere OH-Gruppenkonzentration, welche durch das Schmelzen in der Wasserstoff/Sauerstoff-Flamme hervorgerufen wird. Bei der synthetischen Herstellung durch die Flammenhydrolyse in einer Knallgasflamme werden aus Siliziumte-

trachlorid (SiCl_4) SiO_2 -Nanotröpfchen höchster Reinheit auf ein Trägersubstrat abgeschieden. Der entstandene nanoporöse Sootkörper wird anschließend in einem Dehydrierofen getrocknet, um die Hydroxylgruppen zu entfernen, was nicht vollständig gelingt und folglich zu einem hohen OH⁻-Gehalt (bis zu 1200 ppm) führt. [Hera09] [Sico09]

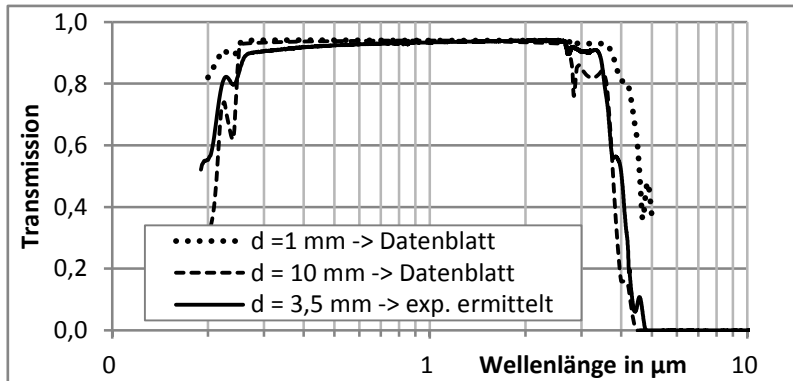


Abb. 3-12: Transmissionskurven von HSQ300

In Abb. 3-12 ist der Transmissionsbereich des verwendeten Quarzglases HSQ300 bei verschiedenen Probendicken d dargestellt. Die gestrichelten Kurven ($d = 1$ mm und $d = 10$ mm) sind dem Datenblatt des Materials entnommen. Dort werden nur Transmissionswerte für den Wellenlängenbereich von 100 bis 5000 nm angegeben. Die eigens durchgeführte Messung² des Transmissionsbereiches bei 3,5 mm Probendicke erfolgte in einem Winkel von 0° , in Transmissionsrichtung. Der erste Teil der Kurve (bis ca. 2000 nm) wurde in einem 2-Strahl-Spektrometer unter Verwendung einer Halogen- und einer Deuteriumlampe aufgenommen. Der zweite Teil in einem Fourierspektrometer. Charakteristisch im Verlauf ist die Absorptionsbande bei $2,7 \dots 3 \mu\text{m}$, resultierend aus den OH⁻-Valenzschwingungen. Da ab $5 \mu\text{m}$ keine

² Transmissionsmessung durch M. Möslin, Layertec GmbH, 2010

Transmission mehr stattfindet, wird – wie eingangs erläutert – zur Temperaturmessung ein Pyrometer mit der Messwellenlänge $5,14\text{ }\mu\text{m}$ verwendet. Der für die vorliegenden Untersuchungen relevante Wellenlängenbereich beginnt oberhalb von $5\text{ }\mu\text{m}$. Für die CO_2 -Lasermaterialbearbeitung (bei $10,6\text{ }\mu\text{m}$) spielt auch die Reflexion eine, wenn auch untergeordnete, Rolle. Sie ist von der Polarisation und dem Einfallswinkel der Strahlung abhängig. Bei Einfallswinkeln $< 60^\circ$ (zur Strahlachse) liegt sie im Bereich von 10-20 % [Engl05]. Der dennoch hohe Grad der Absorption von IR-Strahlung resultiert aus weiteren charakteristischen Absorptionsbanden. So treten bei $6\text{ }\mu\text{m}$ H_2O -Deformationsschwingungen, bei $9,1\text{ }\mu\text{m}$ asymmetrische Si-O-Valenzschwingungen und bei $10,3\text{ }\mu\text{m}$ Si-OH-Deformationsschwingungen auf. Die Strahlung des CO_2 -Lasers ($10,6\text{ }\mu\text{m}$) liegt im Bereich dieser Schwingung, weshalb sie zu $> 80\%$ absorbiert wird. (Vgl. „Vereinfachte Darstellung der Transmission und Reflexion von Quarzglas“ in Abb. 3-1, Abschnitt 3.1.)

3.4 Temperaturerfassung – Methoden, Messgeräte, Einsatzkriterien

3.4.1 Prinzip der berührungslosen Temperaturmessung am Beispiel Pyrometer

Der Prozess der LSP ist maßgeblich von der Temperaturentwicklung auf der Quarzglasoberfläche abhängig, wodurch der Temperaturmessung eine sehr große Bedeutung zukommt. Prinzipiell gibt es zwei verschiedene Arten, Temperaturen und deren Verlauf zu messen – berührend und berührungslos. Im Falle der Bearbeitung von Quarzglas empfiehlt sich, aufgrund der zu erwartenden hohen Temperaturen, die berührungslose Temperaturmessung durch Erfassung der Wärmestrahlung. Dabei wird die Eigenschaft jedes Körpers, mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt (0 K) elektromagnetische Strahlung – die Wärmestrahlung – abzugeben, genutzt. Nach

[Inst08] ist die Strahlungsleistung ϕ die von einem Körper abgestrahlte Energie dW in der Zeit dt .

$$\phi = \frac{dW}{dt} \quad \text{Gl. 3-26}$$

Die spezifische Ausstrahlung M beschreibt die Strahlung, die von einem Flächenelement dA in den über ihm liegenden Halbraum ausgesandt wird, mit

$$M = \frac{d\phi}{dA} \quad \text{Gl. 3-27}$$

Nach dem bekannten PLANCKschen Gesetz berechnet man die spektrale spezifische Ausstrahlung $M_{\lambda S}$ für einen schwarzen Strahler bei einer bestimmten Wellenlänge λ mit der Formel

$$M_{\lambda S} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 \left(e^{\frac{ch}{\lambda k T}} - 1 \right)} \quad \text{Gl. 3-28}$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, k die BOLTZMANN-Konstante und h das PLANCKsche Wirkungsquantum sind. Durch Integration von $M_{\lambda S}$ über λ ergibt sich nach dem STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz die spezifische Ausstrahlung

$$M_S = \int_0^\infty M_{\lambda S} d\lambda = \sigma_{SBK} T^4 \quad \text{Gl. 3-29}$$

Der für die korrekte Temperaturerfassung wichtigste Parameter – der Emissionsgrad ε – errechnet sich aus dem Verhältnis der spezifischen Ausstrahlung M_S eines beliebigen Strahlers zur spezifischen Ausstrahlung M eines schwarzen Körpers

$$\varepsilon = \frac{M_S}{M} \quad \text{Gl. 3-30}$$

und ist von der Oberfläche und der Temperatur abhängig. Entsprechend wird der spektrale Emissionsgrad $\varepsilon(\lambda, T)$ definiert durch:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M_S(\lambda, T)}{M(\lambda, T)} \quad \text{Gl. 3-31}$$

Weiterhin gilt nach dem WIENSchen Verschiebungsgesetz, dass sich mit steigender Temperatur das Strahlungsmaximum zu kür-

zeren Wellenlängen hin verschiebt. Daraus folgt, dass niedrige Temperaturen im langwelligen ($7 - 14 \mu\text{m}$) und hohe im kurzwelligen Bereich ($0,9 - 5 \mu\text{m}$) gemessen werden. Quarzglas zeigt aufgrund seiner in Abschnitt 3.3 beschriebenen Absorptionseigenschaften für die messrelevante Wellenlänge (bei $5,14 \mu\text{m}$) annähernd das Verhalten eines Grauen Strahlers. Da nach KIRCHHOFF der Absorptionsgrad A gleich ε ist, wird die Wechselwirkung der Strahlung mit einem Werkstoff betrachtet, für welche nach Gl. 3-17 gilt, dass die Summe aus Absorption, Reflexion und Transmission gleich 1 ist. Da im Falle von Quarzglas bei $5 \mu\text{m}$ der Grad der Transmission T_{trans} keine Rolle spielt, haben nur der Reflexionsgrad R und die Umgebungsbedingungen Einfluss auf ε .

Für viele Materialien ist der Emissionsgrad in zahlreichen Tabellen in der Literatur dokumentiert. Jedoch nutzen diese Tabellen meist recht allgemeine Werkstoffbeschreibungen und geben ε nur für bestimmte Messwellenlängen an. Sollen Temperaturen für ein ganz bestimmtes Material exakt bestimmt werden, empfiehlt es sich, ε mit Hilfe eines Kalibrierstrahlers zu bestimmen. Das erfolgte auch für das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Quarzglas (siehe Abschnitt 4.4.2).

In Geräten für die berührungslose Temperaturmessung erfassen Detektoren die beschriebene Wärmestrahlung. Zur punktuellen Temperaturerfassung verwendet man Strahlungspyrometer. Ihr allgemeiner Aufbau ist in [Auto04] und [Glüc92] hinreichend beschrieben. Bei der Auswahl des geeigneten Pyrometers sind die Messwellenlänge, der Messbereich, der Messabstand, die Messgeschwindigkeit und der Messfelddurchmesser von zentraler Bedeutung. Messbereiche umfassen stets mehrere hundert Grad, reichen jedoch für Anwendungen, in denen Materialien mit hohen Schmelz- und Siedetemperaturen in allen Aggregatzuständen betrachtet werden sollen, nicht aus. In diesem Fall muss der Anwender entscheiden, ob der Messbereich zu hohen oder niedrigen

Temperaturen hin verschoben werden soll. Die Pyrometeroptik bestimmt über den Messabstand den Messfelddurchmesser. Dieser ist gerade bei Prozessen, die in sehr kleinen Oberflächenbereichen ablaufen, überaus wichtig. Nur wenn innerhalb des Messfeldes die Temperatur konstant ist, kann der tatsächliche Wert erfasst werden, andernfalls erfolgt automatisch eine Integration der Temperatur über die Gesamtfläche, und eine Aussage über die exakte Maximaltemperatur wird unmöglich. Die Messgeschwindigkeit spielt bei Prozessen mit schneller Temperaturänderung, zum Beispiel durch Wärmeleitung, eine große Rolle. Außerdem können bei einer Kombination von Pyrometer und Scannerspiegel Temperaturen nicht nur punkt-, sondern auch linienförmig erfasst werden. Dafür muss die Messgeschwindigkeit aber entsprechend hoch sein.

Die beschriebenen Zusammenhänge können am Beispiel der Preformherstellung für Glaslichtleitfasern verdeutlicht werden [Unge10]. In diesem Verfahren werden Temperaturen, die bis auf etwa ± 5 K konstant sein müssen, pyrometrisch ermittelt. Bei der Preformherstellung werden zur Abscheidung von SiO_2 -Schichten und deren Dotierung durch ein rotierendes, hochreines Quarzglasrohr, welches durch Ringbrenner auf etwa 1840°C erwärmt und später bei 2000°C kollabiert wird, Sauerstoff und gasförmige Halogenidverbindungen geleitet. Das verwendete Pyrometer hat einen Wellenlängenbereich von $4,9 \dots 5,5 \mu\text{m}$ und einen Messbereich von $400 \dots 2500^\circ\text{C}$. Der Emissionsgrad ist mit 0,8 festgelegt und der Messabstand so gewählt, dass der Messfleck vollständig auf der Quarzglasoberfläche liegt. Durch langjährige Erfahrung ist bekannt, dass die Messabweichung über den Jahresdurchschnitt nur etwa 10 K beträgt. Sie wird durch sich mit der Luftfeuchtigkeit verändernde H_2O -Absorptionsbanden hervorgerufen ($5 \dots 8 \mu\text{m}$) [Budz07], die im Spektralbereich des Pyrometers liegen, was durch spektroskopische Untersuchungen belegt ist [Unge10]. In diesem

Verfahren zeigen sich die Eignung und einige Grenzen der pyrometrischen Temperaturbestimmung an Quarzglas.

Da Quarzglas ganz charakteristische Absorptionsbanden aufweist (vgl. Abschnitt 3.3) empfiehlt es sich, für die vorliegende Untersuchung kein schmalbandiges Pyrometer, sondern eines mit fester Messwellenlänge von $5,14\text{ }\mu\text{m}$ zu verwenden. So kann der Einfluss der Wasserdampf- und Kohlendioxidabsorptionsbanden hinreichend ausgeschlossen werden. [Auto04].

Durch ihre unkomplizierte, schnelle Messwertauswertung (bspw. in Temperaturkurven) bietet sich die punktuelle Temperaturerfassung für die Prozessoptimierung sowie für die Überwachung und Steuerung automatisierter Bearbeitungsprozesse an.

3.4.2 Flächenhafte Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera

Um Wärmeleitungsprozesse und die, speziell bei der LSP auftretende, flächenhafte Temperaturverteilung zu erfassen, ist eine Wärmebildkamera erforderlich. Diese Kameras besitzen Detektorarrays aus vielen Einzelelement-Detektoren (Kantenlänge im $10\text{-}\mu\text{m}$ -Bereich). Es wird in gekühlte Photonen-Detektorarrays und ungekühlte Detektorarrays unterschieden. Erstere erfassen die Temperatur wesentlich exakter und hochaufgelöster, sind jedoch stark wellenlängenabhängig. Letztere sind kostengünstiger und für einen größeren Wellenlängenbereich geeignet, erreichen aber nicht die hohen Genauigkeiten der gekühlten Systeme. [Bern04]

Für die Kameras gelten die gleichen Anforderungen wie für die Pyrometer. Hinzu kommt die Größe des Detektorarrays, welche Bildgröße und Auflösung bestimmt. Weiterführende Informationen zur Wärmebildtechnik finden sich in der entsprechenden Literatur (z.B. [Bern04]).

3.4.3 Zur Temperaturmessung verwendete Geräte

In allen Experimenten zur LSP wird das Pyrometer IE 120/51-L der Firma IMPAC verwendet. Ausgewählte Versuche werden zusätzlich mit der Wärmebildkamera SC655 der Firma FLIR Systems beobachtet. Die relevanten Daten der beiden Systeme sind in Tabelle 3-4 gegenübergestellt.

Tabelle 3-4: Daten der Wärmebildkamera SC655 und des Pyrometers IE 120/51-L

Kenngröße	Kamera	Pyrometer
Messbereich (MB)	MB 1: 100...900 °C MB 2: 350...2500 °C	500...2500 °C
Spektralbereich	7,5...9,9 μm (cut-off-Filter)	5,14 μm
Genauigkeit	± 2 K oder ± 2 % des Ablesewertes	1 K + 0,5% der Differenz von Mess- zu Gehäusetemperatur
Erfassungszeit	8 ms	100 ms (min., einstellbar)
Bilderfassungsrate	bis 50 Hz	-
Messfeld	Fläche: 640 \times 480 Pixel	Punkt: \varnothing 1,4 mm (Integration von T)

Der größte Unterschied liegt in der Erfassungszeit und in der Auflösung beider Geräte. Die Kamera kann die reinen Temperaturwerte mehr als zwölfmal so schnell erfassen wie das Pyrometer. Außerdem ist es mit ihr möglich, punktgenau die Maximaltemperatur zu bestimmen. Dabei liegt die Auflösungsgrenze im Bereich eines Pixels. Das Pyrometer hat einen Messfleckdurchmesser von 1,4 mm, innerhalb dessen die Temperatur gemittelt wird. In den entsprechenden Kapiteln zur Versuchsauswertung wird auf diese Fakten näher eingegangen.

3.5 Mechanisches Polieren von Glasoberflächen

3.5.1 Beschreibung des Verfahrens

Zur Einordnung des neuen Verfahrens der LSP in den Stand der Technik ist es sinnvoll, zuvor das herkömmliche mechanische Polieren von Glasoberflächen zu betrachten.

Die Werkstücke, die im Rahmen der Arbeit mittels Laserstrahlung poliert werden, durchlaufen zunächst die Fertigungsschritte Zerteilen (Laserstrahlschneiden) und Schleifen (Form- oder Profilschleifen) bzw. Läppen. Nach DIN 8580 wird das Polieren in die Hauptgruppe Trennen eingeordnet. In der gleichen Gruppe finden sich auch die Verfahren zur Vorbereitung (Schleifen und Läppen). Allen diesen Verfahren ist lt. Definition gemein, dass Material mit geometrisch unbestimmter Schneide vom Werkstück abgetragen wird. Auf das Schleifen und Läppen soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Sie sind Teil der Probenvorbereitung und werden, soweit erforderlich, in den entsprechenden Kapiteln erläutert.

Beim herkömmlichen mechanischen Polieren mit geometrisch unbestimmter Schneide und losem Korn resultiert die Wirkbewegung aus einem rotierenden Werkzeug und einer oszillierenden Werkstückbewegung. Dabei führen sowohl mechanische als auch chemische Wechselwirkungen zur Glättung der Oberfläche. [Blic08] Bei Glasoberflächen kommen zum Materialabtrag durch Sprödbruch auch Fließvorgänge hinzu. [Nöll97] Durch das Polieren – das herkömmliche und das laserunterstützte – sollen Oberflächendefekte, die in der vorangegangenen Bearbeitung entstanden sind, beseitigt werden. Ziel des Verfahrens ist es, blanke, transparente Oberflächen ohne Poren und Tiefenrisse zu schaffen, die darüber hinaus die gewünschte Flächenform und Passgenauigkeit aufweisen. [Reic89]

In der Literatur (z. B. [Hamb01]) werden für die herkömmliche, mechanische Politur verschiedene mögliche Modelle der Wech-

selwirkungen diskutiert. Die Abtraghypothese beschreibt ein vor allem für das Schleifen typisches, rein mechanisches Ausbrechen von Material aus der Oberfläche. Die Fließhypothese setzt dagegen eine Temperaturerhöhung in sehr kleinen Oberflächenbereichen voraus, durch die das Material erweicht und so unter Druck eingeebnet wird. Die chemische Hypothese nennt als Grund für den Materialabtrag die Ausbildung einer Gelschicht auf der zu polierenden Oberfläche. Diese könnte aus der Einlagerung von Wasser in die Glasrandzone resultieren. Dass sich zwischen Glas und Polierkorn eine Verbindung ausbildet, ist Grundlage der Reib-Verschleiß-Hypothese. Die Körner des Poliermittels brechen aufgrund der Belastung, und Kristallfehler werden freigelegt, wodurch das Poliermittel mit dem Glas reagiert und Verbindungen bildet. Diese sind härter als die Glasmatrix, so dass Material abgetragen wird. Auch wenn diese Hypothesen noch nicht vollständig erforscht und belegt sind, ist davon auszugehen, dass sie alle gemeinsam mehr oder weniger stark für das Polierergergebnis verantwortlich sind.

Nach dem Schleifen/Läppen ist die Oberfläche, wie in Abb. 3-13 dargestellt, durch Oberflächenrauheit und durch tiefere Risse gekennzeichnet. Durch die Politur muss folglich nicht nur die Rauheit beseitigt, sondern es müssen auch die Mikrorisse geschlossen werden. Das gilt besonders für thermisch und mechanisch belastetes Glas, da die Tiefenschädigungen Ausgangspunkte für Spannungsrisse und -brüche darstellen.

Die LSP sollte speziell an dieser Stelle erhebliche Vorteile gegenüber der mechanischen Politur aufweisen, da durch das gezielte Erweichen der Oberfläche die tiefen durch das Schleifen und Läppen entstandenen Risse besonders effektiv verschmolzen werden können. Der Materialanteil (in Abb. 3-13) charakterisiert nicht nur geläppte Oberflächen, sondern kann auch als Maß für die Qualität des Polierergergebnisses gelten. Ziel ist es, durch das Polieren einen Traganteil von 100% zu erreichen.

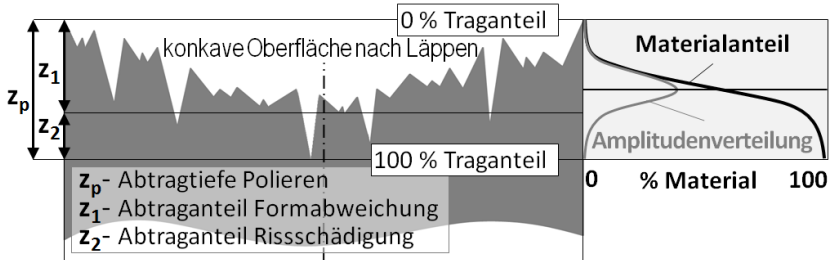


Abb. 3-13: Oberfläche nach Läppen mit Materialanteilskurve nach [Blie08]

Mit welchen Verfahren und Maschinen die herkömmliche mechanische Politur durchgeführt wird, ist in der Fachliteratur (z.B. [Blie08], [Reic89]) nachzulesen und soll an dieser Stelle nicht näher erläutert werden. Fakt ist, dass ein erheblicher Maschinen-, Werkzeug-, Poliermittel- und Zeitaufwand notwendig ist, um Glasoberflächen mechanisch zu polieren. Die Polierzeit t_p ist von der Qualität der Vorbearbeitung, aber auch von der Werkzeuggröße abhängig. Bei bekannter, erforderlicher Abtragtiefe z_p , konstanter Schnittgeschwindigkeit v_c und konstantem Polierdruck p ergibt sich durch Umstellung von

$$z_p = C_p \cdot \int_0^{t_p} v_c \cdot p \cdot dt \quad \text{mit} \quad p = \frac{F_N}{A} \quad \text{Gl. 3-32}$$

nach t_p diese Polierzeit für eine 100 cm² große Planfläche zu 400 s (4 s/cm²) [Blie08]. Ist das Werkzeug kleiner, verlängert sich die Zeit.

3.5.2 Definition einer polierfähigen Oberfläche

Um eine Glasoberfläche polieren zu können, muss sie bestimmte Anforderungen erfüllen. Für die herkömmlichen Polierverfahren sind die Eigenschaften der sogenannten polierfähigen Oberflächen bekannt und definiert. Erreicht werden können sie nur durch eine entsprechende Vorbearbeitung aus Vor- und Feinschleifen und (für hohe Ebenheits-, Parallelitäts- und Winkelanforderungen) Läppen [Blie08]. In Bezug auf die Formabweichung

muss ein polierfähiges Werkstück eine Genauigkeit von etwa 2...8 Ringen aufweisen. Da das Polieren unmittelbar nach dem Läppen erfolgt, können folgende Kriterien einer geläpften Oberfläche als Voraussetzung für eine polierfähige Oberfläche gelten:

- keine Läppmittelrückstände
 - geringe Rautiefe ($R_q = 1...5 \mu\text{m}$)
 - hoher Traganteil (100% nach $3...4 \mu\text{m}$)
 - kratzer- und aussprungfreie Oberfläche
 - Radienabweichung* von $0,3...3 \mu\text{m}$
 - Mittendickentoleranz* von $5...10 \mu\text{m}$
 - Formgenauigkeit von 2...8 NEWTONschen Ringen
- (*gilt für sphärische und asphärische Flächen)

3.5.3 Mechanische Vergleichs-Politur

Im herkömmlichen Polierprozess werden aus Gründen der Kostenminimierung und Effektivität teilweise mehrere Komponenten auf einen Werkstückträger gekittet und so zeitgleich bearbeitet. Um tatsächlich einen Vergleich des Laserpoliervorgangs zur klassischen Politur herstellen zu können, werden 20 Quarzglasproben auf einer geeigneten Maschine mechanisch poliert. Ihr Ausgangszustand ist identisch mit dem der Proben für die LSP. Der Vorgang der mechanischen Bearbeitung umfasst dabei auch die komplette Poliovorbereitung, bestehend aus Vorschleifen, Feinschleifen und Läppen. Das Vorschleifen ist notwendig, um die durch das Kitten entstandenen Abweichungen der Probenhöhen anzugleichen. Müsste nur eine einzelne Probenoberfläche (Probe) bearbeitet werden, könnte dieser Schritt entfallen. Aber die Bearbeitung insgesamt würde ineffektiv, weil in diesem Fall die volle Bearbeitungszeit für eine einzige Probe anfallen würde. Durch die schrittweise Bearbeitung aus Schleifen, Läppen und Polieren wird ein Formfehler von 4...5 Ringen erreicht und die erzielte Oberflächenrauheit liegt bei $R_a = 5...10 \text{ nm}$. Der gesamte Bearbeitungsvorgang dauert 8 h. Das ergibt eine Gesamtbearbeitungszeit inkl. Polieren von 24 min/Probe bzw. $3,8 \text{ min/cm}^2$.

Die reine Polierzeit beträgt etwa die Hälfte (10 min/Probe; 1,9 min/cm²). Der Vor- und Feinschleifprozess zu Höhenanpassung ist bei der LSP nicht nötig. Würde bei der mechanischen Vergleichspolitur auch nur eine Probe einzeln poliert werden, ergäbe sich aber ebenfalls eine Polierzeit von 30 min pro Probe. Durch die LSP sollte es möglich sein, diese Bearbeitungszeit auf einige Sekunden/cm² zu reduzieren. Der Vorteil der schrittweisen mechanischen Bearbeitung liegt in der Verbesserung der Formgenauigkeit. In wieweit das mittels LSP erreicht werden kann, muss untersucht werden.

3.6 Laserstrahlpolierprozess – Ausgangsbedingungen und Modellbeschreibung

3.6.1 Funktionsprinzip

Im Gegensatz zur klassischen mechanischen Politur resultiert die Glättung der Quarzglasoberfläche beim Laserstrahlpolieren aus der Wechselwirkung des Werkstoffs mit der Laserstrahlung, also aus der eingetragenen Energie und der dadurch entstehenden deutlichen Temperaturerhöhung, die sich auf die Werkstoffeigenschaften auswirkt. In Abschnitt 3.2 werden CO₂-Laser und in Abschnitt 3.3 das zu bearbeitende Material Quarzglas näher beschrieben. Daraus ist bekannt, dass die Wellenlänge des Lasers (10,6 µm) vom Material sehr gut absorbiert wird, womit sich ein hoher Energieeintrag durch die Laserstrahlung ergibt.

Da Quarzglas (innerhalb der für die Lasermaterialbearbeitung geeigneten Materialien) einen vergleichsweise geringen Wärmeleitungskoeffizienten besitzt, würde ein punktuell Bestrahlen der Oberfläche mit einem fokussierten Strahl (Abb. 3-14 a)) überwiegend zu Materialabtrag durch Verdampfen führen. Grundvoraussetzung für den Polierprozess ist deshalb eine scannende Strahlführung mit hoher Geschwindigkeit und großem Strahldurchmesser (defokussierter Strahl) zur flächigen Erwärmung größerer

Oberflächenbereiche (Abb. 3-14 b)). Der Energieeintrag darf dabei nicht zu groß werden (Abb. 3-14 c)), da sonst der Materialabtrag stark zunimmt, wobei sich die Wärmeeinflusszone (WEZ) weiter in die Tiefe des Quarzglaskörpers ausdehnt.

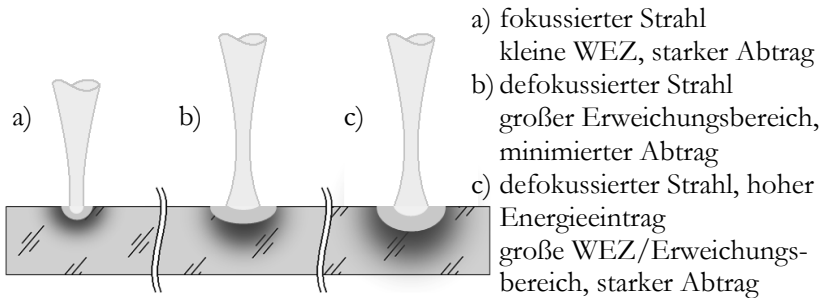


Abb. 3-14: Wirkung fokussierter und defokussierter Laserstrahlung auf das Quarzglas

Der schematische Aufbau für die Polierversuche ist in Abb. 3-15 a) dargestellt. Die maximale Ablenkgeschwindigkeit des Laserstrahles durch die Spiegel beträgt 3 m/s, wobei der Strahl zeilenförmig über die Quarzglasoberflächen geführt wird. Auf Grund dieser hohen Geschwindigkeit entsteht ein linienförmiger Energieeintrag, der während des Prozesses als sog. „Polierlinie“ zu sehen ist (Abb. 3-15 b)). Sie wird durch die Achse der Portalanlage mit einem definierten Vorschub über die zu polierende Oberfläche bewegt. Die Überlagerung der Scanlinien variiert je nach Strahl- und Vorschubgeschwindigkeit.

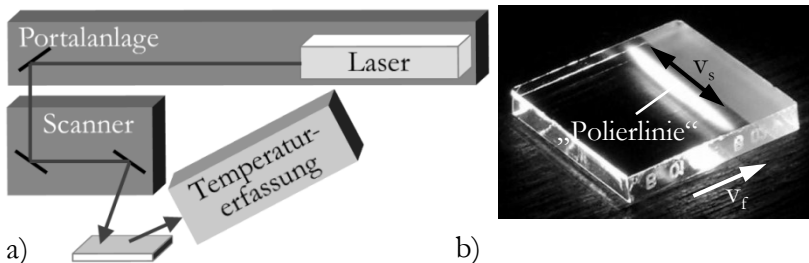


Abb. 3-15: Laserstrahlpolierprozess a) Schema Versuchsanordnung b) Probe während der LSP

3.6.2 Simulation der Laserstrahlpolitur

Für die Simulation des Polierprozesses³ werden weitere Annahmen und Randbedingungen festgelegt (siehe Tabelle 3-5).

Tabelle 3-5: Ausgangs- und Randbedingungen für LSP-Simulation

Parameter	Einheit	Wert
Material		Quarzglas
Größe	[mm ³]	25x25x4
Laserleistung	[W]	460
Strahl, Gaussprofil, Ø	[mm]	6,4
Vorschub (v_f)	[mm/min]	15; 25; 35
Starttemperatur (Raum-, Umgebungs-, Bauteiltemperatur)	[°C]	20
Konvektion/Strahlung (hohlgelagerte Proben)	[W/mm ²]	25
ϵ für Abstrahlung		0,8
Elemente (der FEM-Simulation)		Solid und Viskos

Die numerische Simulation nutzt ein 3D-Modell, welches auch die physikalische Nichtlinearität in den voneinander entkoppelten thermischen und mechanischen Simulationen berücksichtigt. In einer ersten thermischen Simulation zur Ermittlung und Wirkung des Energieeintrags wird angenommen, dass beim Auftreffen des Laserstrahls auf die Glasoberfläche die Absorptionsrate 80 % beträgt ($\epsilon = 0,8$). Daraus folgt die Annahme, dass 20 % der Laserstrahlung reflektiert werden, denn im infraroten Bereich oberhalb der Wellenlänge von 5 μm erfolgt keine Trans-

³ Die Simulation erfolgte nach eigenen Vorgaben an der BAUHAUS-UNIVERSITÄT Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen durch J. Hildebrand und wurde gemeinsam in [Hild11] veröffentlicht.

mission der Strahlung durch das Quarzglas. [Hild11] Die Strahlung des CO₂-Lasers wird mit einem Absorptionskoeffizienten von $\beta > 10^3 \text{ cm}^{-1}$ absorbiert [Geot91].

Die optische Eindringtiefe des Laserstrahls ist definiert mit:

$$\delta_{opt} = \frac{1}{\beta} \quad \text{Gl. 3-33}$$

Für den genannten Absorptionskoeffizienten β ergibt sich damit eine optische Eindringtiefe von $\delta_{opt} < 10 \text{ }\mu\text{m}$. Sie liegt im Bereich der Wellenlänge des CO₂-Lasers. Die Strahlintensität des Lasers wird – mathematisch idealisiert betrachtet – als GAUß-normal verteilt angenommen.

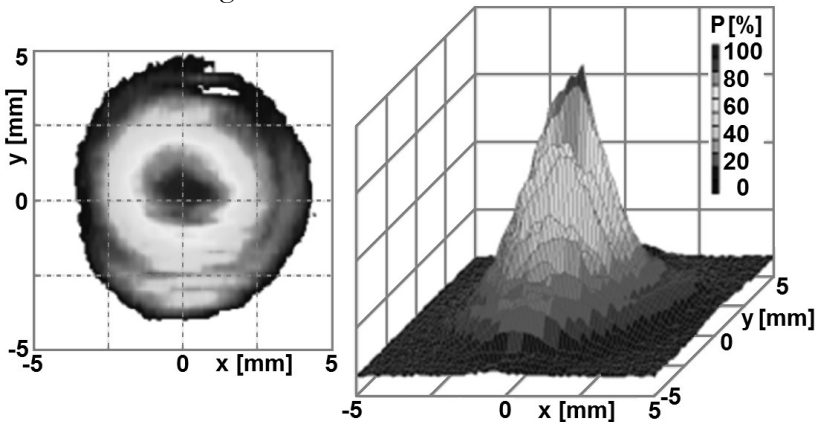


Abb. 3-16: 2D & 3D-Darstellung des Strahlprofils (Laser SM1500P) bei $P = 620 \text{ W}$; $z = +100 \text{ mm}$

Das reale Strahlprofil weist die beschriebene GAUßförmige Verteilung der Laserleistung auch nach dem Scanner und bei einem Abstand zum Fokus von $z = +100 \text{ mm}$ auf (Abb. 3-16).

Das wurde in der Strahlanalyse des verwendeten CO₂-Lasers SM1500P nachgewiesen. Ein Auszug aus den Ergebnissen dieser Analyse findet sich in der Tabelle 3-6. Hier sind die vorgegebene Laserleistung, die tatsächlich gemessene im Rohstrahl und die des defokussierten Strahls nach dem Scanner gegenüber gestellt.

Für die Simulation beträgt der Energieeintrag der Laserstrahlung nach dem Scanner und bei einer Fokusslage von $z = +100$ mm ca. 460W, das entspricht einer vorgegeben Leistung von 27%.

Tabelle 3-6: Analyse des Strahlprofils

programmierte Leistung	%	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Leistung des Rohstrahls	W	207	340	429	522	601	668	736	785	851
Leistung nach Scanner ($z = +100$ mm)	W	188	290	373	441	496	553	600	641	682

Für die nichtlineare Simulation werden die temperaturabhängigen Materialkennwerte Enthalpie, Wärmeleitfähigkeit, Ausdehnungskoeffizient, Elastizitätsmodul und dynamische Viskosität verwendet. Sie werden als temperaturabhängige Größen in der FE-Simulationssoftware SYSWELD® programmiert.

Die Ergebnisse der Simulation geben Aufschluss über die zu erwartende Temperatur, Temperaturverteilung, Spannung und Spannungsverteilung im laserpolierten Quarzglas.

Die Temperaturkurven der simulierten LSP (Abb. 3-17) zeigen, dass die drei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Maximaltemperaturen resultieren. Weiterhin zeigen sich die zu erwartenden Unterschiede im zeitlichen Verlauf der Temperatur. Der steile Anstieg der Kurven verdeutlicht die rasche Erwärmung des Materials durch die sehr effiziente Energieeinkopplung. Die Abkühlung erfolgt deutlich langsamer und resultiert nach 1000 s in den in Abb. 3-18 dargestellten Vergleichsspannungen von Mises.

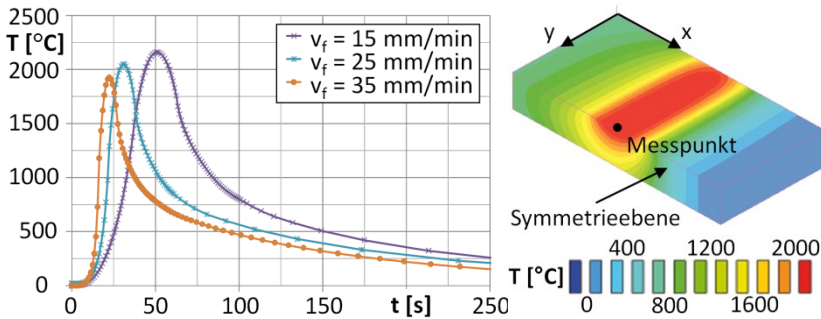


Abb. 3-17: Simulierte Temperaturänderung (zeitabhängig) in festem Messpunkt auf Probenoberflächenmitte für verschiedene v_f und 3D-Darstellung des Temperaturfeldes [Hild11]

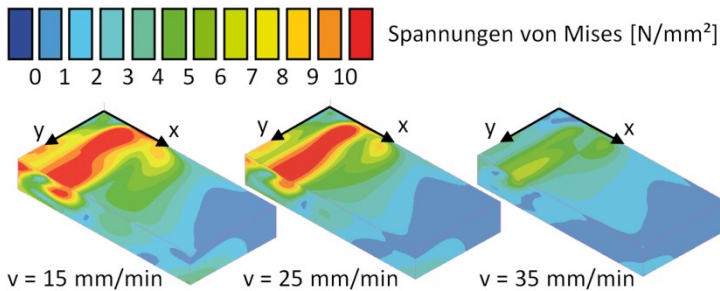


Abb. 3-18: Auswirkung unterschiedlicher v_f auf die Vergleichsspannung von Mises 1000 s nach Politurbeginn [Hild11]

Weitere Simulationsergebnisse zeigen, dass die Spannungen, welche während der LSP auftreten, noch größer sind, da ein erheblicher Temperaturunterschied zwischen Probenober- und -unterseite herrscht (s. a. 6.5.3). Während der Abkühlung wird ein erheblicher Teil dieser Spannungen bereits abgebaut. Es wird in der Simulation weiterhin deutlich, dass mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit die Maximaltemperatur abnimmt und so die Spannungen reduziert werden können.

3.6.3 Thermische Nachbehandlung (Kühlkurve) der Proben nach der LSP

Temporäre Spannungen während der Laserstrahlpolitur sind unkritisch, wenn sie nicht unmittelbar bei der Bearbeitung zu Sprüngen oder Brüchen führen. Das wird durch die hohe Temperaturwechselbeständigkeit – resultierend aus der geringen Wärmeausdehnung des Quarzglases – gewährleistet. Nach [Nöll97] kann bei Kenntnis des linearen Ausdehnungskoeffizienten α der Bereich der Temperaturwechselbeständigkeit TWB durch die Gl. 3-34 abgeschätzt werden.

$$\Delta T = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{\alpha} \quad \text{Gl. 3-34}$$

Für das verwendete HSQ300 wird α mit $4,8 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ angegeben (vgl. Tabelle 3-3). Demnach ergibt sich $\Delta T = 2292 \text{ K}$. Es wird hier deutlich, warum die Laserstrahlpolitur, bei der Temperaturunterschiede von mehr als 2000 K zwischen Oberfläche und Probeninnerem herrschen, durchführbar ist, ohne dass Risse oder Sprünge auftreten.

Da das Material nach der Politur frei abkühlt, werden in bestimmtem Maße Kühlspannungen im Quarzglas zurück bleiben. Es ist bekannt, dass solche thermischen Spannungen die Härte und Festigkeit verändern [Scho88]. Speziell gegen Zugspannungen, welche durch unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten zwischen Oberfläche und Innerem entstehen, ist Glas sehr empfindlich [Nöll97]. Auch wenn durch gezieltes thermisches Vorspannen versucht wird, die Härte von Glasoberflächen zu steigern, müssen im Fall der LSP die ungewollten und unkontrollierten Spannungen durch einen gesteuerten Kühlprozess beseitigt werden.

Nach [Scho88] sollte die Kühlkurve so aufgebaut sein, dass mit Erreichen der oberen Entspannungstemperatur (1220 °C [Hera09]) die Viskosität gering genug ist, dass Strukturänderungen und damit der Spannungsabbau vollzogen werden. Bis zum Erreichen der unteren Entspannungstemperatur (1125 °C [Hera09]) erfolgt die Abkühlung so langsam, dass nur noch gerin-

ge Unterschiede zwischen der Temperatur der Oberfläche und der im Inneren herrschen. Die Viskosität ist in diesem Bereich gerade so groß, dass bei längerer Haltezeit noch Spannungen abgebaut werden können. Es hat sich in den Untersuchungen gezeigt, dass es für den Spannungsabbau in den kleinen Proben praktisch ausreicht, eine Temperatur von 1065 °C entsprechend lange zu halten. Nach dem Unterschreiten der unteren Entspannungstemperatur wird die Abkühlgeschwindigkeit theoretisch nur durch die Temperaturwechselbeständigkeit beschränkt. Für Quarzglas kann sie folglich hoch sein. Aus den Betrachtungen ergibt sich die Kühlkurve in Abb. 3-19. Sie geht davon aus, dass die nach der LSP spontan erkalteten Proben nochmals im Kühl-ofen erhitzt werden.

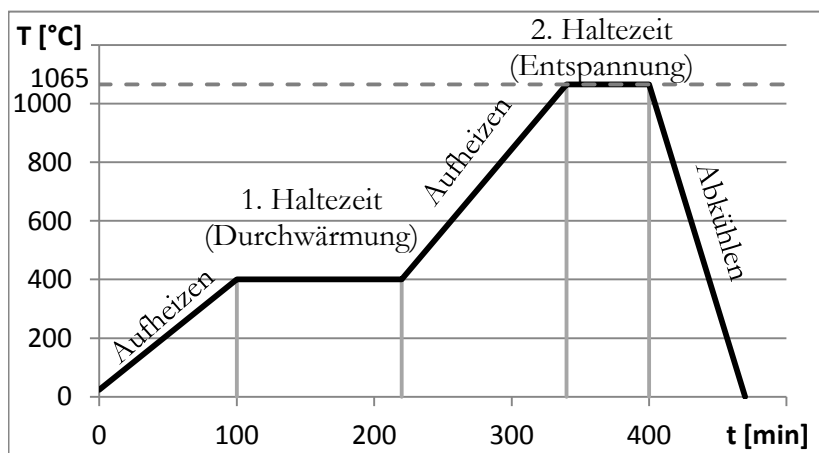


Abb. 3-19: Kühlkurve der laserstrahlpolierten Quarzglasproben

Bei der Diskussion der Ergebnisse wird in Abschnitt 6.3.3 auf die Materialspannungen im laserstrahlpolierten Quarzglas näher eingegangen. Es zeigt sich dort, dass mit optimierten Prozessparametern und bei bestimmten Probengrößen auf die thermische Nachbehandlung der Proben verzichtet werden kann.

3.6.4 Einfluss von Viskosität und Oberflächenspannung

Bei den Betrachtungen zum Kühlprozess wurde bereits auf den Zusammenhang zwischen Temperatur und Viskosität hingewiesen. Quarzglas hat – verglichen mit anderen Gläsern – im gesamten, technisch interessanten Temperaturbereich eine hohe Viskosität. Nach der VOGEL-FULCHER-TAMMANN-Gleichung (Gl. 3-35) kann die Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet werden, wenn 3 Messpunkte bekannt sind. Es sei:

$$\begin{aligned}\eta_1 &= 10^{14,5} \text{ dPa's bei } T_1 = 1125 \text{ °C} && \text{Unterer Entspannungspunkt} \\ \eta_2 &= 10^{13} \text{ dPa's bei } T_2 = 1220 \text{ °C} && \text{Oberer Entspannungspunkt} \\ \eta_3 &= 10^{7,6} \text{ dPa's bei } T_3 = 1710 \text{ °C} && \text{Erweichungspunkt}\end{aligned}$$

$$\lg \eta = A + \frac{B}{T - T_0} \quad \text{Gl. 3-35}$$

Die Konstanten T_0 , A und B müssen wie folgt berechnet werden:

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= T_{0'} + T_2 \\ A &= A' + \lg \eta_2 \\ B &= A' T_{0'} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{(Berechnung von } T_{0'} \text{ und } A') \\ \text{siehe [Nöll97]} \end{array}$$

$$\lg \eta = -8,34 + \frac{30881,8}{T + 1446,8} \quad \text{Gl. 3-36}$$

Nach Gl. 3-36 kann die Viskosität des verwendeten HSQ300 in Abhängigkeit von der Temperatur durch das Diagramm in Abb. 3-20 beschrieben werden. Die Angaben der Hersteller zur Viskosität von Quarzglas enden bei maximal 2000 °C. Deshalb stellt der gestrichelt dargestellte Bereich der Kurve die rein theoretisch berechneten Werte dar, welche aufgrund des hohen Dampfdruckes des Quarzglases nicht überprüft werden können. In jedem Fall ist auch bei den hohen auftretenden Laserstrahlpoliertemperaturen die Viskosität noch sehr groß (bei 2500 °C noch höher als bei der Schmelze konventioneller Mehrkomponentengläser). Als anschauliches Beispiel sei die Viskosität von

Honig bei Raumtemperatur genannt, die 10^5 dPa·s beträgt [Mich08] und damit in etwa der des HSQ bei 2000 °C entspricht.

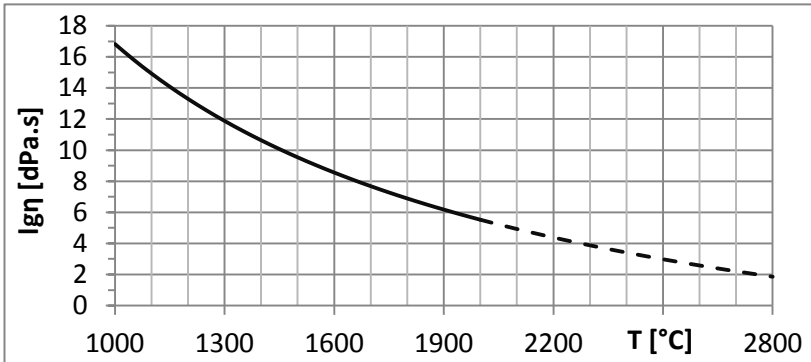


Abb. 3-20: Berechnete Viskosität des HSQ300 in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Glättung der Quarzglasoberfläche bei der LSP resultiert aus den zwischenmolekularen Kräften in der Schmelze. Eine Flüssigkeit ist bestrebt, den für sie energetisch günstigsten Zustand einzunehmen. Das bedeutet, ihre Oberfläche zu minimieren. Die Oberflächenspannung σ führt folglich dazu, dass eine vormals raue, unebene Quarzglasoberfläche beim Erweichen des Materials mit fortschreitender Zeit ihre Fläche verringert, wodurch das Profil (z. B. Rauheit) in seiner Tiefe abnimmt und schließlich verschwindet. Dieser Prozess läuft umso schneller ab, je geringer die Viskosität der Flüssigkeit ist. In [Salm07] wird die Oberflächenspannung der SiO_2 -Schmelze bei 1800 °C mit $\sigma = 307$ mN/m angegeben. Weiterhin gilt für die Schmelze ein negativer Temperaturkoeffizient der Oberflächenspannung, wodurch sich diese um ca. 4 mN/m pro 100 K verringert [Salm07] [Scho88]. Das führt dazu, dass bei höherer Temperatur mehr Moleküle die Oberfläche verlassen können, da die ihnen entgegenwirkende Kraft der Oberflächenspannung abnimmt.

3.6.5 Betrachtungen zum Materialabtrag durch die Laserstrahlpolitur

Der Polierprozess soll, wie bereits beschrieben, ohne signifikanten Materialabtrag stattfinden. Um das zu überprüfen, wird die Masse der Proben vor und nach der Politur mittels Präzisionswaage bestimmt. Die Angabe des Materialverlustes kann so auf 1 mg genau erfolgen.

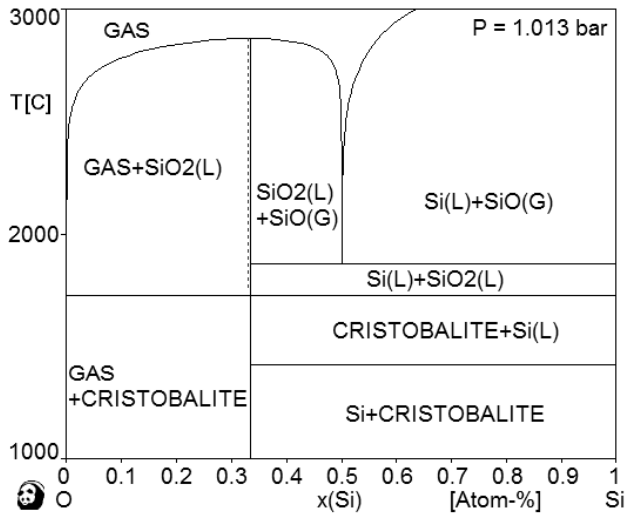


Abb. 3-21: Phasendiagramm⁴ O-Si nach [Schm10]⁵

Da es sich beim Laserstrahlpolieren nicht um einen mechanischen Abtrag handelt, sondern um ein (nicht gewolltes) Verdampfen bzw. Verdunsten aus der flüssigen Phase, muss der Dampfdruck p_D der SiO_2 -Schmelze betrachtet werden. Die Literatur bietet nur wenige Informationen zu diesem Thema. In älteren Veröffentlichungen (z. B. [Fand85]) wird p_D für SiO_2 bei 1950 °C mit 133 mbar angeben. Nach [Salm07] kann p_D berech-

⁴ Erstellt mit der Software Pandat der Firma

CompuTherm LLC

⁵ Abb. 3-21 wurde gegenüber der Quelle um $\text{SiO}(\text{G})$ ergänzt

net werden, wenn zu allen 3 Phasen die entsprechenden thermodynamischen Daten vorliegen. Das ist in dieser genannten Veröffentlichung jedoch nicht der Fall. So erfolgt dort eine Abschätzung des Dampfdruckes von SiO_2 bei 1730°C zu 10^{-7} bar und bei 2730°C zu 10^{-1} bar. Der Druck von 1,013 bar – also der Siedepunkt – wird bei etwa 2830°C erreicht. Diese Annahmen sind vergleichbar mit Werten, die durch die Software Pandat [Chen09] bestimmt werden können. Die Bedingungen bei der LSP in normaler Atmosphäre (also „Luft“) werden dabei nach [Schm10] noch vereinfacht. Es ergibt sich eine Berechnung für SiO_2 und O_2 (Gas) bei 1 bar Normaldruck. Die gestrichelte Linie im Phasendiagramm in Abb. 3-21 gibt die Zusammensetzung an, bei der gerechnet wird. In Abb. 3-22 ist p_D von SiO_2 in Abhängigkeit von der Temperatur bis zum Siedepunkt dargestellt.

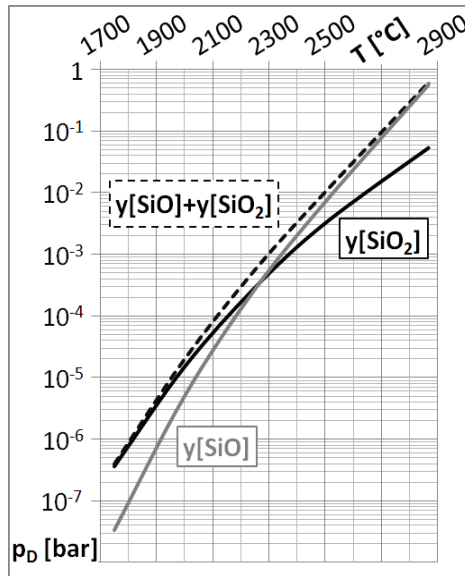


Abb. 3-22: Dampfdruck von SiO_2 nach [Schm10]

Es sind die Dampfdrücke von SiO und SiO_2 separat und in der Addition abzulesen. Diese Darstellung gleicht auffallend der zuvor beschriebenen von [Salm07] und gibt die Siedetemperatur von SiO_2 mit 2865°C an. Bei 2100°C beträgt p_D 0,1 mbar, bei 2300°C 1 mbar und bei 2500°C schon 10 mbar. Das ist ausreichend für die technische Verdampfung in bewegter Atmosphäre. Bei Wasser spricht man bspw. ab einem Dampfdruck von

6,1 mbar von Verdunstung [Hatr09]. Diese Ausführungen belegen, dass der Materialabtrag während der LSP nicht vollständig vermieden werden kann.

Die Ergebnisse der Experimente zeigen, ob es sich dabei um einen messbaren Materialverlust handelt, oder ob er durch die Optimierung des Polierprozesses vernachlässigbar gering wird.

4 Laserstrahlpolieren – experimenteller Aufbau

4.1 Anforderungen an den experimentellen Aufbau

In diesem Kapitel werden die Anlagenkonzepte für die Untersuchungen zur LSP in ihrem Aufbau und ihrer Funktionsweise beschrieben. Das schließt weiterhin die Integration der notwendigen Zusatzkomponenten für die Scanbewegung und die Temperaturerfassung ein.

Um den Prozess des Laserstrahlpolierens umfassend zu untersuchen, müssen zunächst die notwendigen Komponenten und deren Integration definiert werden. Auch das Festlegen von Ausgangs- und Versuchsbedingungen sowie der grundsätzlichen Analyseverfahren für die Versuchsergebnisse erfolgt an dieser Stelle. Generell werden folgende Komponenten für die experimentellen Untersuchungen zur LSP verwendet:

- CO₂-Laser (+ Steuerung)
- Optik für Strahlführung/-formung (Spiegel, F-Theta Optik)
- Scanner für schnelle Strahlbewegung
- Achssystem für Relativbewegung
- Probenunterlage
- Temperaturmess-einrichtung
- Kühlöfen

Die geringe Anzahl der Komponenten verdeutlicht bereits einen Vorteil der Laserstrahlpolitur, nämlich dass mit relativ wenigen optischen Elementen die Strahlführung und -formung realisiert werden kann. Der Laser als wichtigste und teuerste Komponente im Anlagenkonzept, kann neben dem Laserstrahlpolieren für viele weitere Anwendungen (z. B. Schneiden und Schweißen) genutzt werden. Der Prozess kommt, verglichen mit dem herkömmlichen mechanischen Polieren, ohne Zusatzmaterial (ausgenommen die Lasergase) aus, und es entstehen keine Abfallprodukte.

Nach dem Verlassen des Lasers wird der Strahl über Spiegel zum Scanner geführt. Eine Strahlformung durch ein Teleskop ist bei

den verwendeten Anlagen nicht erforderlich. Die einzig notwendige Strahlformung ist ein $\lambda/4$ -Spiegel für die Änderung der Polarisation von linear auf zirkular. Da außerhalb des Strahlfokus gearbeitet wird, empfiehlt sich ein Achssystem, über dessen Z-Achse der Strahldurchmesser einfach und sehr genau verändert werden kann. Weil der Scanner nur einen begrenzten Arbeitsraum hat und in den Experimenten u. a. der Vorschub der beschriebenen Polierlinie untersucht werden soll, kommt auch die 2. Achse (senkrecht zur Z-Achse) zum Einsatz.

Die Mindestanforderung an die Unterlage der zu polierenden Quarzglasproben wird durch ihr Verhalten gegenüber defokussierter Laserstrahlung und der daraus resultierenden Wärme bestimmt. In Voruntersuchungen kommt hierfür Graphit zum Einsatz, da es CO_2 -Laserstrahlung hinreichend absorbiert [Kloc06] und bei zu hohem Energieeintrag nicht schmilzt sondern sublimiert [Hüge92]. Durch seine hohe Wärmeleitfähigkeit wird der Probe jedoch sehr schnell Wärme entzogen. Weiterhin führt der Abrieb des weichen Graphits zur Verunreinigung der Quarzglasoberflächen. In den späteren Versuchsreihen wird deshalb der Werkstoff OM 100 als Unterlage verwendet. Dieses hochreine, opake Quarzgut der Firma Heraeus zeichnet sich durch seine Mikroporosität (Porendurchmesser $< 20 \mu\text{m}$) und die daraus resultierende diffuse Streuung von Wärmestrahlung aus [Hera10]. Auf diese Weise wird die Wärme nicht aus der Probe abgeleitet, sondern teilweise zurück reflektiert [Naum10]. Wie groß der Einfluss der Unterlage auf den Unterschied in den Bearbeitungstemperaturen und deren Verlauf während der LSP tatsächlich ist, wird in 6.5.3 untersucht.

Die Grundlagen der Temperaturmessung wurden bereits in Abschnitt 3.4 erläutert. Da der Temperatur beim Laserstrahlpolieren eine große Bedeutung zukommt, wird ihre Erfassung gesondert in Abschnitt 5.4.1 behandelt.

Der Kühlprozess, seine Bedeutung und sein Ablauf wurden bereits in 3.6.3 behandelt, schließt sich stets an die LSP an. Die Proben werden nach dem Polieren zum Kühlen in den Ofen gelegt.

4.2 CO₂-Laser mit Galvo-Scannersystem

4.2.1 Aufbau der Versuchsanlage

Diese Anlage wird für den Hauptteil der experimentellen Untersuchungen zur LSP genutzt und steht im Günter-Köhler-Institut für Füge-technik & Werkstoffprüfung GmbH Jena. Der verwendete Laser ist der in 3.2 beschriebene 1,5 kW SM1500P der FEHA GmbH.

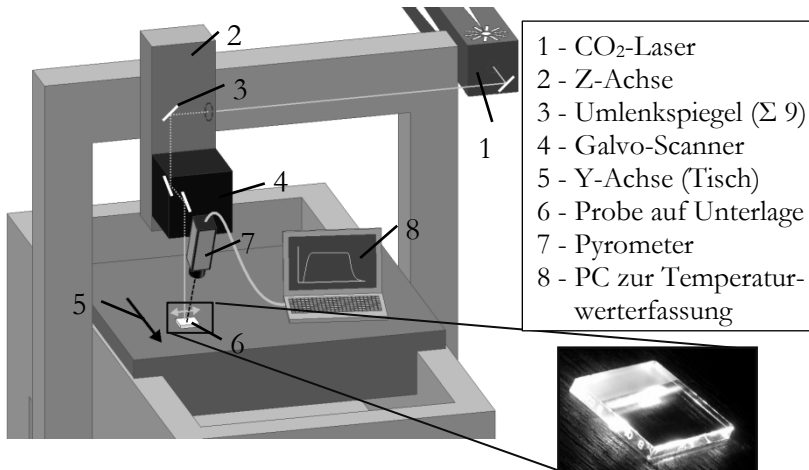


Abb. 4-1: Aufbau der CO₂-Laseranlage mit Galvo-Scannersystem

Die Abb. 4-1 zeigt die Anordnung der in 4.1 genannten Komponenten. Abweichend von der schematischen Darstellung ist der Laser im realen Versuchsaufbau weiter von der Portalanlage entfernt. Der Laserstrahl kann nach dem Prinzip des seriellen Mehrstationenbetriebs über Spiegel in unterschiedliche Bearbeitungsbereiche geführt werden [Blie05]. Im vorliegenden Fall wird der Rohstrahl nach dem Verlassen des Resonators über 9 hochreflektierende Umlenkspiegel zum Scanner geführt. Dieser besteht aus

2 silberbeschichteten Siliziumspiegeln und einer F-Theta Optik aus Zinkselenid, durch die der Strahl fokussiert in den Bearbeitungsbereich abgebildet wird. Jeder der Umlenkspiegel führt dabei zu einem Leistungsverlust von etwa 2 % (Gesamtverlust durch Spiegel ca. 270 W). Der Scanner selbst verursacht einen zusätzlichen Leistungsverlust von ca. 10 %. Damit ist auch der Unterschied zwischen der Ausgangsleistung von 1500 W laut Datenblatt und der in der Strahlanalyse ermittelten (vgl. 3.2.3) von 1000 W zu erklären. Durch die Spiegel wird der Strahl hauptsächlich in Richtung der Y-Achse bewegt. Die Antriebe der Scannerspiegel basieren auf dem Prinzip der Galvanometer. Ein Spiegel ist an einem Torsionsstab aus magnetischem Material befestigt und dieser ist von Spulen umgeben. Wird eine Steuerungsspannung an die Spulen angelegt, so entsteht durch den Stromfluss in der Spule ein Magnetfeld. So wird der Torsionsstab mit dem Spiegel aus seiner Ruhelage ausgelenkt. [TRUM06] Die F-Theta Optik im Scanner sorgt dafür, dass der Strahldurchmesser im gesamten Scanfeld konstant bleibt [Popr05]. Der Tisch der verwendeten Portalanlage bildet die Y-Achse und trägt auf einer Unterlage die Proben.

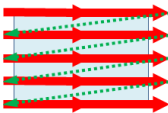

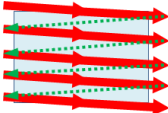
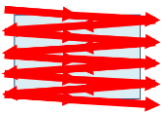
Die Geräte zur Temperaturerfassung – im Regelfall das schon mehrfach genannte Pyrometer IE 120/51-L – können je nach Messkonzept fest zum Laserstrahl oder fest zur Probe angebracht werden.

4.2.2 Scankonzepte – Strahlführung auf der Quarzglasoberfläche

Wie in 3.6.2 beschrieben, wird mit Hilfe des Scanners eine Polierlinie erzeugt. Dabei sind die in Tabelle 4-1 aufgelisteten Konzepte möglich. Die grün-gepunkteten Linien stellen die Scannerstellbewegung bei ausgeschaltetem Strahl dar. Die Umkehrpunkte sowie die Beschleunigungs- und Abbremsbereiche der Scanbewegung liegen stets außerhalb der zu polierenden Oberfläche. Andernfalls würde dort ein wesentlich höherer Energieeintrag

stattfinden, was zu ungleichmäßigen Polierergebnissen führt. Der Vorteil der Y-Achse liegt in der Vergrößerung des Arbeitsbereiches über die Scannfeldgröße hinaus und – wichtiger noch – in der Veränderbarkeit der Vorschubgeschwindigkeit v_f , welche über diese Achse realisiert wird. Durch die Vorschubbewegung der Y-Achse verlaufen die Scanlinien nicht mehr waagrecht sondern schräg über die Probenoberfläche.

Tabelle 4-1: Übersicht der möglichen Scankonzepte

Name	Unidirektional waagrecht	Bidirektional waagrecht (Mäander)	Unidirektional schräg	Bidirektional Schräg (Zick-Zack)
y-Achse	nein	nein	ja	ja
Schema				

Bleibt v_f während der Politur konstant, dann verändert sich der Linienabstand im unidirektionalen Scankonzept dadurch nicht und die Linien bleiben parallel zueinander. Bei dem Konzept der bidirektionalen Bewegung erfolgt dagegen auch bei konstantem v_f eine Linienabstandsänderung. Je näher der Strahl den Umkehrpunkten kommt, desto geringer wird der Abstand zur nächsten Scanlinie (vgl. Tabelle 4-1, rechte Spalte). Der größte Linienabstand besteht dann zwischen 2 untereinander liegenden Umkehrpunkten. Für die Untersuchungen spielt das nur eine untergeordnete Rolle, da die Überlagerung der Linien insgesamt sehr groß ist. In der Übersicht (Tabelle 4-1) wurde zur Veranschaulichung der Konzepte auf ihre Darstellung verzichtet.

Im Folgenden soll jedoch die Überlagerung selbst näher betrachtet werden, da sie als Einzelgröße für den Laserstrahlpolierprozess eminent wichtig ist. Der Grad der Überlagerung sei nach [jena06] als prozentualer Wert durch

$$\ddot{U}G = \frac{A_{\ddot{U}F}}{A_{Strahl}} \cdot 100\% \quad \text{Gl. 4-1}$$

definiert, wobei A_{Strahl} die Querschnittsfläche des defokussierten Laserstrahles auf der Probenoberfläche angibt und $A_{\ddot{U}F}$ die Überlagerung desselben.

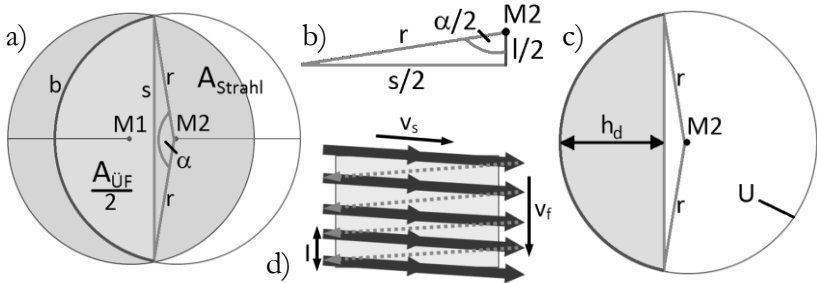


Abb. 4-2: Skizzen zur Berechnung des Grades der Überlagerung $\ddot{U}G$

Der Radius r in Abb. 4-2 ist der Radius des defokussierten Laserstrahls. Die zweite wichtige Größe ist der Linienabstand l , der über den Zusammenhang in Abb. 4-2 b) in die Berechnung von $\ddot{U}G$ einfließt. Dieser Linienabstand resultiert aus den Prozessgrößen Vorschub v_f und Scangeschwindigkeit v_s (Abb. 4-2 d)).

$$l = \left(\frac{x}{v_s} + \frac{x}{v_{sr}} \right) \cdot v_f \quad \text{Gl. 4-2}$$

Die Größe x ist der programmierte Weg des Strahles über die Probe. Für das vorliegende Beispiel wird er mit 25 mm angenommen, das entspricht der Kantenlänge der vornehmlich verwendeten Proben. Der Überlauf auf beiden Seiten resultiert aus der Defokussierung (Abstand zur Fokusslage), da der Weg immer für den Strahl im Fokus programmiert wird. Der Ausdruck x/v_{sr} steht für die Rückstellbewegung beim einzeiligen Scankonzept.

Aus bekannten geometrischen Zusammenhängen (vgl. Tabellenwerke) lassen sich folgende Gleichungen für die Berechnung von $\ddot{U}G$ aufstellen:

$$\frac{A_{\ddot{U}F}}{2} = \frac{1}{2} \cdot [r \cdot (b - s) + s \cdot h_d] \quad \text{Gl. 4-3}$$

Die Fläche $A_{\ddot{U}F}/2$ entspricht einer Kreissegmentfläche mit der Höhe h_d eines Kreises des Umfangs U (vgl. Abb. 4-2 c)). Sie wird von der Sehne s und dem Kreisbogen b begrenzt.

$$b = \frac{\alpha \cdot U}{360^\circ} \quad b - \text{Bogenlänge} \quad \text{Gl. 4-4}$$

$$\frac{l}{2r} = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \rightarrow \alpha = 2 \cdot \arccos\left(\frac{l}{2r}\right) \quad \text{Gl. 4-5}$$

$$b = \frac{4 \cdot \pi \cdot r \cdot \cos^{-1}\left(\frac{l}{2r}\right)}{360^\circ} \quad \text{Gl. 4-6}$$

Durch entsprechendes Umstellen und Einsetzen der bekannten Zusammenhänge erhält man für den Grad der Überlagerung die Formel:

$$\ddot{U}G = \left(\frac{\arccos\left(\frac{l}{d_f}\right)}{90^\circ} - \frac{2l}{\pi \cdot d_f^2} \sqrt{d_f^2 - l^2} \right) \cdot 100\% \quad \text{Gl. 4-7}$$

Um bereits an dieser Stelle zu zeigen, dass der Grad der Überlagerung so groß ist, dass die Verteilung der Leistung über das Strahlprofil (vgl. Abb. 3-16 in Abschnitt 3.6.2) nicht zu einem inhomogenen Energieeintrag auf der Quarzglasoberfläche führt, wird er für typische Werte aus den späteren Experimenten berechnet.

Es sei $v_s = 800 \text{ mm/s}$, $v_f = 30 \text{ mm/min}$, $x = 25 \text{ mm}$ und $v_{sr} = 3250 \text{ mm/s}$ (experimentell ermittelt Rücklaufgeschwindigkeit der Scanner-Galvometerspiegel), wodurch sich aus Gl. 4-2

der Linienabstand $l = 19,5 \mu\text{m}$ ergibt. Mit Gl. 4-7 und dem Wert für den Durchmesser des Strahles $d_f = 6,9 \text{ mm}$ (durch Strahlanalyse bestimmt) bei einem Abstand zum Fokus (Defokussierung) von $z = +100 \text{ mm}$ beträgt der Grad der Überlagerung $\ddot{U}G = 99,6 \%$.

Wird das Scankonzept „Zick-Zack“ verwendet, dann gilt $0 \leq l \leq 31,3 \mu\text{m}$ und damit $99,4 \% \leq \ddot{U}G \leq 100 \%$. Im gesamten Bereich der zu polierenden Probenoberfläche liegt der Grad der Überlagerung folglich immer über 99 %.

4.2.3 Ermittlung relevanter Laserstrahlparameter

In den vorangegangenen Ausführungen sind alle Parameter, die im Zusammenhang mit der LSP untersucht werden, bereits genannt. Es empfiehlt sich aber an dieser Stelle eine Zusammenfassung zur besseren Übersicht.

Tabelle 4-2: Relevante Laserstrahlparameter

Parameter		Einheit	Bereich	Bemerkung
Laserleistung auf Probenoberfläche	P	W	500...1000	durch Strahlanalyse ermittelt
Scan-geschwindigkeit	v_s	mm/s	600...1500	programmiert
Vorschub	v_f	mm/min	5...60	berechnet, programmiert
Strahldurchmesser	d_f	mm	3...7	berechnet, durch Strahlanalyse bestätigt

Die Parameter P , v_s und v_f werden in 5.4 näher untersucht. Im Rahmen der Untersuchungen wird d_f später nicht mehr verändert. Die Festlegung des Durchmessers erfolgt hier an dieser Stelle auf Grund erster Untersuchungen. Abb. 4-3 zeigt den Einfluss des Strahldurchmessers (resultierend aus Abstand zum Fokus) auf zwei relevante Bewertungsgrößen für die LSP.

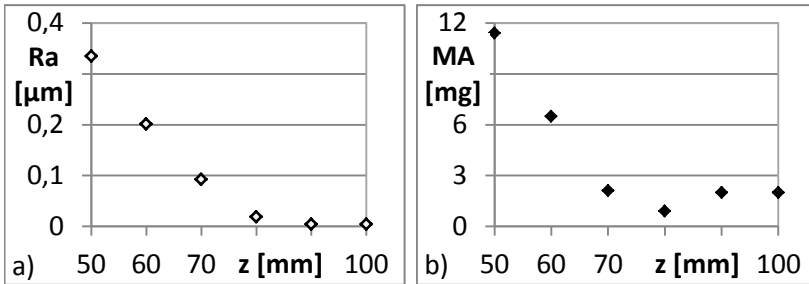


Abb. 4-3: Einfluss Defokussierung auf Laserstrahlpolitur

a) Rauheit, b) Materialabtrag

Der schon mehrfach angesprochene Materialabtrag MA wird durch die stärkere Defokussierung in positiver z-Richtung vermindert. Die eingebrachte Energie wird gleichmäßiger auf der Oberfläche verteilt, der Grad der Überlagerung nimmt zu. Es erfolgt ein gleichmäßigeres Erweichen der Quarzglasoberfläche. Das wirkt sich ebenso positiv auf die erreichbare Oberflächenrauheit aus. Auch die Werte für Ra nehmen mit zunehmender Defokussierung (bei nahezu gleichbleibender Leistungsdichte) ab.

Auf Grund dieser Untersuchungen wird z für die späteren Experimente auf +100 mm festgelegt, wodurch sich der bereits genannte Strahldurchmesser von 6,9 mm ergibt.

4.3 CO₂-Laser mit neu entwickeltem Piezo-Scannersystem

4.3.1 Aufgabenstellung für Piezo-Scannersystem

Das zuvor beschriebene Anlagenkonzept birgt Nachteile hinsichtlich des eingesetzten Scanners. Dieser ist in seinem Aufbau sehr komplex und damit teuer. Weiterhin benötigt er einen verhältnismäßig großen Bauraum, eine separate Kühlung und besteht aus 2 Spiegeln sowie einer Optik, die zu spürbaren Verlusten der Strahlleistung führen. Der entscheidende Nachteil aber liegt in der Fokussierung durch die F-Theta-Optik. Wie die vorangegangenen Betrachtungen bereits zeigen, wirken

sich Unterschiede im Strahldurchmesser auf der Probenoberfläche deutlich aus. Solange es sich um ebene Oberflächen handelt, ist der Strahldurchmesser über die Z-Achse einstellbar und muss nicht verändert werden. Sobald die Oberfläche aber eine Geometrie, deutlich abweichend von der Ebene – z. B. Linsenradius oder Mikrogeometrie – zeigt, ist eine gleichmäßige Politur nicht mehr möglich. Für das zweite Laserstrahlpolierkonzept kommt deshalb eine Kippspiegeleinheit, basierend auf Piezoantrieben, zum Einsatz. Dieses System muss zwei Spiegeldrehachsen besitzen und eine hohe Vorschubgeschwindigkeit von etwa 2 m/s erreichen können, um vergleichbare Bedingungen zur ersten Anlage zu schaffen.

4.3.2 Spezielle Systemanforderungen

Der neue Scanner soll in die Anlage des 2 kW DC020 Lasers der Rofin-Sinar Laser GmbH (vgl. 3.2) integriert werden, da für diesen bisher kein Scanner zur Verfügung steht. Daraus ergeben sich folgende grundlegende Anforderungen:

- Auslenkung des Laserstrahls in zwei Achsen durch einen Spiegel
- Antrieb durch Multilayer-Piezoaktoren
- Bearbeitung von Werkstücken mit Abmessungen von etwa 25 x 25 x 5 mm³
- variable Scanbewegungen zum Polieren der Quarzglasoberfläche
- Scangeschwindigkeit v_s bis 2 m/s
- hohe Anpassbarkeit an verschiedene Einsatzorte
- kostengünstige Fertigung und Instandhaltung

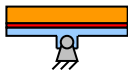
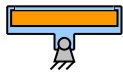
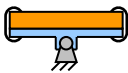

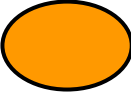

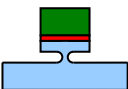

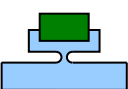
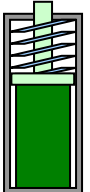
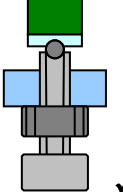
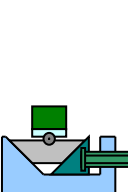
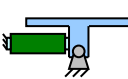
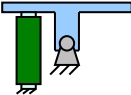
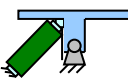
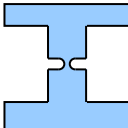
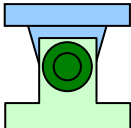
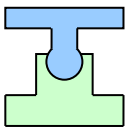
Die erste Anforderung stellt bereits eine der entscheidenden Vereinfachungen und einen Vorteil des neuen Scanners dar. Er kommt im Gegensatz zum herkömmlichen Prinzip mit nur einem Spiegel aus. Dieser ist nicht nur letztes Element der Strahlführung sondern kann gleichzeitig eine Fokussieroptik

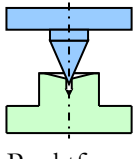
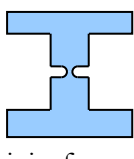
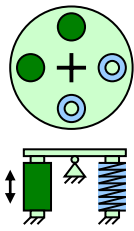
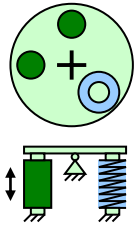
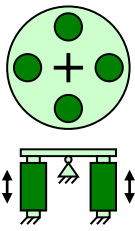
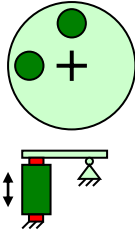
sein. Wird ein Planspiegel oder einer mit großem Radius (z. B. 2000 mm) gewählt, so vergrößert sich der Bereich des konstanten Strahldurchmessers (Parallelstrahl oder große RAYLEIGH-Länge) erheblich. Damit ist eine gleichmäßige LSP unabhängig von den Höhenunterschieden auf den Quarzglaselementen zu erreichen. Durch die Piezoaktoren besteht die Möglichkeit, den einen Spiegel in 2 Richtungen zu steuern. Weiterhin reduzieren sich durch die Piezoaktoren und den Wegfall eines zweiten Spiegels Gewicht und Größe des Scanners. Nur ein Spiegel bedeutet außerdem weniger Laserstrahlleistungsverlust – ein weiterer Vorteil des neuen Systems. Die Piezoaktoren sind leicht durch Anlegen einer Spannung ansteuerbar und erreichen sehr hohe Stellgeschwindigkeiten. Die Begrenzung des Bearbeitungsfeldes entspricht der Probengröße (25 mm Kantenlänge), welche hauptsächlich während der Experimente bearbeitet wird und stellt eine Vereinfachung im Entwicklungsprozess dar. Die Anpassbarkeit des kostengünstigen Systems an verschiedene Einsatzorte soll schon im Rahmen der Entwicklung den späteren Nutzen des neuen Scanners für den praktischen Einsatz in der Industrie berücksichtigen. Das angestrebte System soll wegen seiner Einfachheit ein breites Anwendungsfeld finden.

4.3.3 Auswahl, Entwicklung und FEM-Analyse des Piezoscanersystems

Die Entwicklung des Piezoscaners erfordert zunächst Überlegungen zum Piezoaktor, zu den notwendigen Gelenken und zum Spiegel. Die Tabelle 4-3 bietet hierfür eine Übersicht und erleichtert so das Verständnis für die Auswahl des Konstruktionskonzeptes für den zu entwickelnden Piezoscanner.

Tabelle 4-3: Übersicht der Komponenten und Funktionen des Piezoscanners [jena02]

Teilfunktion		Teilfunktionsträger			
	Variante	1	2	3	4
Spiegel	Fixierung/ Aufnahme	 Kleben ✓	 Rahmen	 Klammern	
	Form	 rund ✓	 oval	 rechteckig	
Aktor	Fixierung/ Einbau	 Kleben	 Klemmen ✓	 Rahmen	
	Justage/ Vorspannung	 Feder	 Stellschraube ✓	 Keiltrieb	
	Einbau- Richtung	 waagrecht	 senkrecht ✓	 winklig	
Gelenk	Art	 Festkörper	 Wälzlager	 Gleitlager ✓	

Teilfunktion		Teilfunktionsträger			
	Variante	1	2	3	4
Gelenk	Form	 Punktform	 Linienform ✓		
	Räumliche Anordnung	 2x Piezo 2x Feder	 2x Piezo 1x Feder ✓	 4x Piezo (Gegenlauf)	 2x Piezo (Zug+Druck)

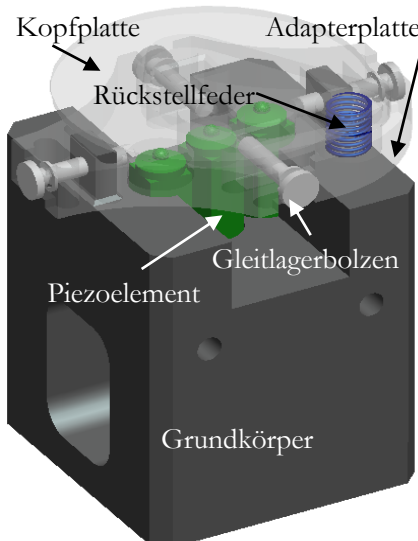
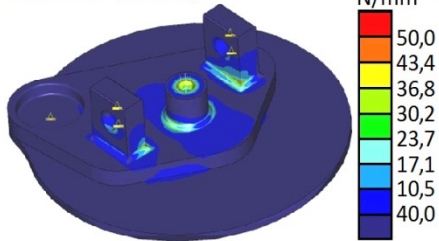


Abb. 4-4: Modell des Piezoscanners [jena02]

In der konstruktiv umgesetzten Lösung werden 2 Piezoaktoren senkrecht eingeklebt und geklemmt. Ihre Justage und Vorspannung erfolgt mittels Stellschraube. Die Aktoren wirken gegen eine Feder über ein linienförmiges Gleitlager auf die Bewegung eines runden, geklebten Spiegel. Abb. 4-4 zeigt das Modell des Piezoscanners nach der Konstruktion. Auf die Kopfplatte

wird ein 1,5“ Siliziumspiegel (Dicke 4 mm, Reflektivität 99,8 %) geklebt. Auf diese Platte wirken ein Piezoaktor und die Rückstellfeder. Sie ist über ein Gelenk mit der Adapterplatte verbunden. Diese wird durch zwei Piezoaktoren im Gegenlauf bewegt,

Von Mises Spannungen



Betrag der Verschiebung

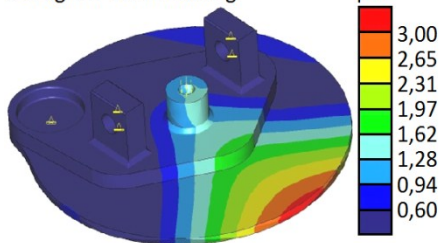


Abb. 4-5: FEM-Analyse der Kopfplatte (Spannungen/Verschiebung)
[jena02]

wodurch sich die Positioniergenauigkeit und die Stellgeschwindigkeit erhöhen.

Bei einer Neuentwicklung ist die Analyse der Komponenten hinsichtlich ihrer Belastung und Verformung vorteilhaft, um vorzeitiges Versagen der Bauteile zu verhindern. Für diese Entwicklung wird die Finite Elemente Methode (FEM) verwendet. Es werden die relevanten Bauteile Kopfplatte, Adapterplatte und Grundkörper untersucht.

An dieser Stelle wird nur

auf die Ergebnisse der Kopfplatte näher eingegangen. Diese ist von der Bewegung der Adapterplatte abhängig, trägt den Spiegel und ist damit das letzte Glied in der Konstruktionskette. Sie ist für die Strahlführung verantwortlich und muss leicht sein, damit eine schnelle Stellbewegung möglich wird. Somit hat ihr Verhalten einen großen Einfluss auf die Funktion des Scanners.

Die größten Spannungen ($\sigma_{max} = 50 \text{ N/mm}^2$), dargestellt in Abb. 4-5, treten im Bereich der Lager auf. Die Streckgrenze des Werkstoffes (Cr-Ni-Stahl X5CrNi18-10) liegt mit 210 N/mm^2 jedoch mehr als 4-mal so hoch. Die maximal auftretende Verformung der Kopfplatte (Abb. 4-5) – bei fixierten Gleitlagern –

ist mit $3\text{ }\mu\text{m}$ gering. Sie kann durch eine entsprechend elastische Klebschicht ausgeglichen werden, so dass keine Verformung des Spiegels erfolgt. Die maximale Verformung würde nur bei schlagartiger Beanspruchung eintreten. Die Ansteuerung der Aktoren erfolgt jedoch inkrementweise und somit definiert und bauteilschonend.

4.3.4 Umsetzung und Erprobung des neuen Scannersystems

Nach der – durch die FEM unterstützten – Konstruktion erfolgte die Fertigung und Montage des Piezoscanners. Die Komponenten enthalten z. T. Fertigungstoleranzen bis $\pm 0,02\text{ mm}$, was hohe Anforderungen an die Fertigungstechnik stellt. Auf einem 5-Achs-CNC-Bearbeitungszentrum (Firma Hermle AG) konnten die benötigten Bauteile konstruktionsgerecht und innerhalb der geforderten Genauigkeit umspannungsfrei gefräst werden. Die Entwicklung der Ansteuerung für die Piezoaktoren erfolgte durch ein auf dieses Gebiet spezialisiertes Unternehmen, welches ebenfalls mit der Programmierung einer Bediensoftware beauftragt wurde.

Der Piezoscanner in Abb. 4-6 wird – wie eingangs erwähnt – in die Anlage des DC020 Lasers integriert (Abb. 4-7). Bei diesem System liegen zwischen ausgekoppeltem Laserstrahl und Portalanlage (zur Bearbeitung) nur 500 mm. In diesem kurzen Abschnitt

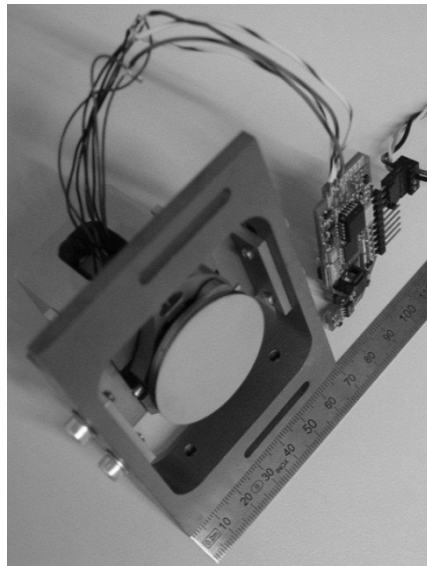


Abb. 4-6: Neu entwickelter Piezoscanner [jena02]

erfolgt durch das Einbringen zweier Umlenkspiegel in den Strahlengang die Einbindung des Scanners. Mit diesen kann der parallele Rohstrahl auch auf einen geeigneten Durchmesser geformt werden. Der Spiegel am Scanner ist ein Fokussierspiegel mit großer Brennweite und daraus resultierender großer RAYLEIGH-Länge. Damit wird der Prozess unabhängig von der Höhe der Oberflächenelemente, und es können auch 2½-D Objekte poliert werden. Die geringe Anzahl der Spiegel minimiert Justageaufwand und Leistungsverlust.

Der X-Y-Tisch der Portalanlage kann zur zusätzlichen Positionierung und Bewegung der zu polierenden Proben genutzt werden. Das ermöglicht die Bearbeitung größerer Bereiche als die in 4.3.2 genannten 25 x 25 mm².

Erste Ergebnisse zur LSP mit dem neuen Scanner werden in Abschnitt 8.3 vorgestellt.

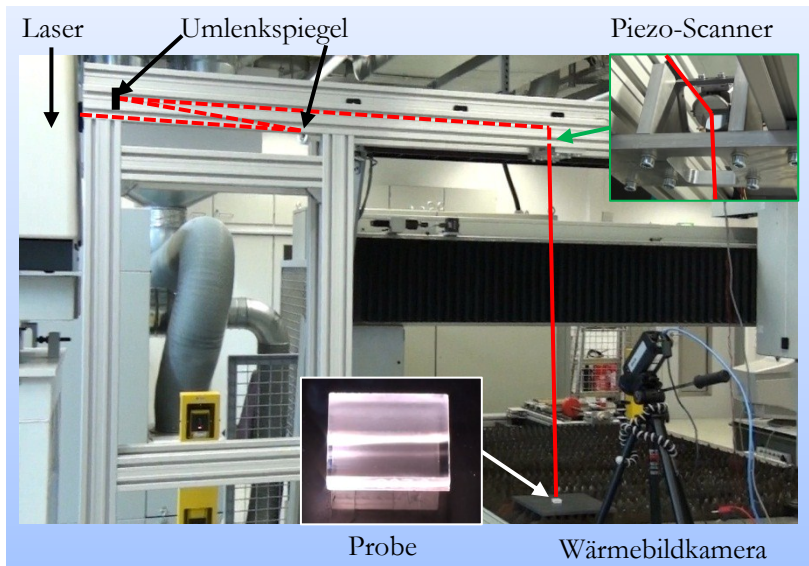


Abb. 4-7: Einsatz des neuentwickelten Piezoscanners an der Anlage des DC020 Lasers

5 Experimente

5.1 Ablauf der Experimente

Für alle nun folgenden Untersuchungen gilt die gleiche Prozesskette (Abb. 5-1). Zunächst werden die Proben mit dem CO₂-Laser SM1500P aus Quarzglasplatten zugeschnitten und anschließend gekühlt (Kühlkurve aus 3.6.3). Die Probengröße liegt für den Hauptteil der Untersuchungen bei 25 x 25 x 3 mm³ (andere Abmessungen werden gesondert behandelt). Nach dem Kühlen werden die beiden großen, gegenüberliegenden Flächen spanend durch Läppen oder Schleifen bearbeitet. Das dient dazu, definierte Ausgangsbedingungen auf allen Oberflächen zu schaffen, um später die tatsächlichen Ergebnisse der Laserstrahlpolitur erfassen zu können. Im Anschluss an die sog. Vorbearbeitung erfolgt das Vermessen der Probenoberflächen am Tastschnittmessgerät. Hier werden Ausgangsrauheit und -welligkeit bestimmt. Das bereits angesprochene Wiegen findet ebenfalls an dieser Stelle statt. Nun folgt die LSP unter den jeweiligen Versuchsbedingungen mit den entsprechend ausgewählten Bearbeitungsparametern, wobei stets die Temperaturmessung mittels Pyrometer (in Einzelfällen mittels Wärmebildkamera) erfolgt.

Im Anschluss an die Politur werden die Proben erneut gekühlt, um Spannungsrisse zu

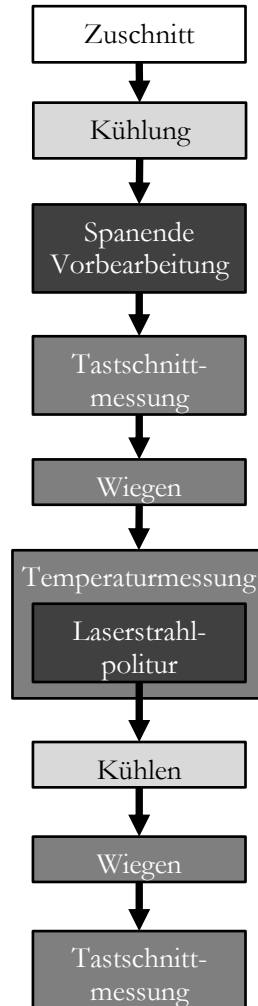


Abb. 5-1: Prozesskette der Laserstrahlpolitur

vermeiden, wobei einige ausgewählte zuvor spannungsoptisch untersucht werden. Alle Proben werden danach gewogen und am Tastschnittmessgerät hinsichtlich Verbesserung der Oberflächenparameter untersucht. Alle Abweichungen von dieser Prozesskette werden gesondert besprochen, sofern sie wichtige Ergebnisse liefern.

Die Prozessschritte Vorbearbeitung – speziell Schleifen – und LSP unterliegen in dieser Kette einer ständigen Optimierung, mit dem Ziel, letztendlich die Minimierung der Oberflächenrauheit durch die LSP bei gleichzeitig minimalem Materialabtrag zu erreichen und, mit Hilfe der Festlegung der idealen Ausgangsparameter und Poliertemperatur, den Laserstrahlpolierprozess reproduzierbar zu gestalten.

5.2 Probenvorbereitung durch Läppen

Die Mehrzahl der Proben, auf denen die LSP untersucht wird, werden durch Läppen vorbereitet. Dieses Verfahren ist für die spanende Bearbeitung von Glasoberflächen mit geometrisch unbestimmter Schneide hinlänglich bekannt und wird ausreichend gut beherrscht. Es ist für diese Arbeit nicht notwendig, dieses Verfahren zu untersuchen oder zu optimieren. Weiterhin bietet das Läppen den entscheidenden Vorteil, dass in relativ kurzer Zeit eine große Anzahl von Proben mit gleicher Oberflächenqualität präpariert werden können. Für das Läppen kommt die Läpp- und Poliermaschine NLP220 H-2 von Naicotec zum Einsatz. Das Läppmittel Abralox® Optical Grade, ein Normalkorund (Al_2O_3) mit einer Härte 9 nach Mohs, wird in ungebundener Form und in verschiedenen Körnungen verwendet, um unterschiedliche Ausgangsrauheiten auf den Quarzglasproben zu schaffen. So kann der Einfluss der Ausgangsoberflächen auf die erreichbaren Oberflächenqualitäten durch die LSP untersucht werden. Dafür erfolgt eine Einteilung der geläppten Proben in drei Gruppen A, B und C, die sich aus den 3 unterschiedlichen Rauheitsklassen nach [Böge07] N5, N6, N7 ergeben (vgl. Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Rauheitsklassen nach DIN EN 1302

Rauheits- klasse N	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Mittenrau- wert Ra [μm]	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025

Gruppe A umfasst alle Proben, für die $0,8 \leq \text{Ra} < 1,6$ gilt, Gruppe B alle, für die $0,4 \leq \text{Ra} < 0,8$ gilt und Gruppe C alle, für die $0,2 \leq \text{Ra} < 0,4$ gilt. Diese Einteilung der Proben entsprechend der Rauheitswerte erfolgt nach dem ersten Vermessen am Tastschnittmessgerät (vgl. Abb. 5-1 in 5.1). Zur Differenzierung der Proben erhalten sie anschließend eine Lasergravur. Außerdem werden für jede Probe alle Werte der Welligkeit und Rauheit erfasst und für die spätere Auswertung archiviert.

5.3 Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide

5.3.1 Begründung der Vorbearbeitung durch Schleifen

Damit die LSP auf komplexeren Oberflächen durchgeführt und untersucht werden kann, spielt die Untersuchung und Optimierung des Schleifprozesses für den beschriebenen zukünftigen Einsatz der Laserstrahlung eine wichtige Rolle. Während durch Läppen nur ebene Oberflächen oder konventionelle Linsen bearbeitet werden können, bietet das Schleifverfahren die Möglichkeit, auch komplexere Konturen auf Quarzglasoberflächen zu schaffen. Für diese Untersuchung und Optimierung des Schleifens werden zunächst ebenfalls ebene Probenoberflächen bearbeitet und anschließend laserstrahlpoliert, um die Ergebnisse mit denen der geläpften Oberflächen zu vergleichen. In einem weiteren Schritt wird eine erste 2½ D Testgeometrie gefertigt.

5.3.2 Statistische Versuchsplanung

Die Statistische Versuchsplanung wird z. B. angewendet, um bereits bestehende Prozesse zu optimieren, reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten und dabei mit einem möglichst geringen Versuchsaufwand auszukommen. [Klep08] Das wird auch für die vorliegende Arbeit angestrebt. Durch die Einbindung statistischer Werkzeuge erfolgt eine Absicherung gegen Fehlentscheidungen auf Grund von Zufallsstreuung. Das wird ermöglicht, indem der beobachtete Unterschied in den Versuchsergebnissen erst dann akzeptiert wird, wenn er nur mit ausreichend kleiner Wahrscheinlichkeit zufällig auftritt, obwohl er in Wirklichkeit nicht vorhanden ist. [Klep08] Für beide zu optimierende Verfahren – das Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide (5.3) und das Laserstrahlpolieren (5.4) – wird das lineare Regressionsmodell verwendet. Dieses betrachtet mathematische Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen. Aus Voruntersuchungen ist dieser lineare Zusammenhang bekannt. Exemplarische Versuche bei der LSP mit einem sternförmigen Versuchsplan, welcher nichtlineare Abhängigkeiten aufzeigen würde, haben bestätigt, dass es diese nicht gibt. Es wird im Folgenden immer mit vollfaktoriellen Versuchsplänen gearbeitet. Eine der wichtigsten Auswertungen wird die der Signifikanz der einzelnen Bearbeitungsparameter für den zu optimierenden Prozess bzw. die Ergebnisse aus diesem sein. Solch ein Versuchsplan umfasst eine Anzahl k von Faktoren (Prozessparameter) auf je 2 Stufen. Je nach Anzahl der Faktoren spricht man von einem 2^k -Plan. Wie sich aus den Faktorstufenkombinationen die Effekte und ihre Signifikanz berechnen lassen, ist in der entsprechenden Literatur nachzulesen (z. B. [Klep08]) und soll an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden. Es wird außerdem darauf verzichtet, weitere wichtige Auswertmöglichkeiten der Statistischen Versuchsplanung und dafür verwendeter Software an dieser Stelle theoretisch abzuhan-

deln. Soweit erforderlich, werden sie an entsprechender Stelle am konkreten Beispiel erläutert.

Der vollfaktorielle Versuchsplan für das Schleifen untersucht jeweils 3 Faktoren. Es werden Untersuchungen an drei verschiedenen Maschinen durchgeführt. Es sind dies das Umfangs-Planschleifen auf der CNC-Flach- und Pendelschleifmaschine der Firma Ziersch und Baltrusch, das Schleifen auf der konventionellen CNC-Fräsmaschine UWF 721H der Hermle AG und das ultraschallunterstützte Schleifen auf der Ultrasonic 20 linear der DMG GmbH. Die drei untersuchten Faktoren variieren leicht auf Grund der Maschinenspezifik, die Zielgrößen sind immer gleich. Eine vollständige Übersicht findet sich in Tabelle 5-2 aus der sich drei Versuchspläne ergeben.

Tabelle 5-2: Übersicht der Faktoren/Zielgrößen für das Schleifen der Quarzglasproben

	Flach- und Pendel- schleifmaschi- ne	CNC-Fräs- maschine	Ultraschall- unterstützte CNC-Fräs- maschine
Faktoren (Stufen)	Vorschub v_f [m/min] (7,41 und 17,39)	Vorschub v_f [m/min] (10 und 30)	Vorschub v_f [m/min] (10 und 30)
	Arbeitseingriff a_e [mm] 0,005 und 0,02	Arbeitseingriff a_e [mm] (0,03 und 0,1)	Arbeitseingriff a_e [mm] (0,03 und 0,1)
	Schnittbreite a_p [mm] (0,1 und 3)	Spindeldrehzahl n_g [min ⁻¹] (6000 und 12000)	Spindeldrehzahl n_g [min ⁻¹] (5000 und 10000)
Zielgrößen	Rauheit (Ra, Rq)		
	Welligkeit (Wa, Wq)		

5.3.3 Schleifen ebener Proben - Ergebnisse

Das Umfangs-Planschleifen auf der CNC-Flach- und Pendelschleifmaschine ermöglicht, wie das Läppen, die Bearbeitung mehrerer Proben in einer Aufkittung (Abb. 5-2). Das Kitten ist bei allen Schleifbearbeitungen notwendig. Direktes mechanisches Spannen der Proben z. B. in den Maschinenschraubstock ist zu vermeiden, da die dabei auftretenden (vorwiegend) punktuellen Belastungen zum vorzeitigen Versagen des Quarzglases führen. Die Parameter, die in der Versuchsreihe variiert werden, befinden sich in Tabelle 5-3, zusammen mit allen weiteren Kenngrößen der Bearbeitung.

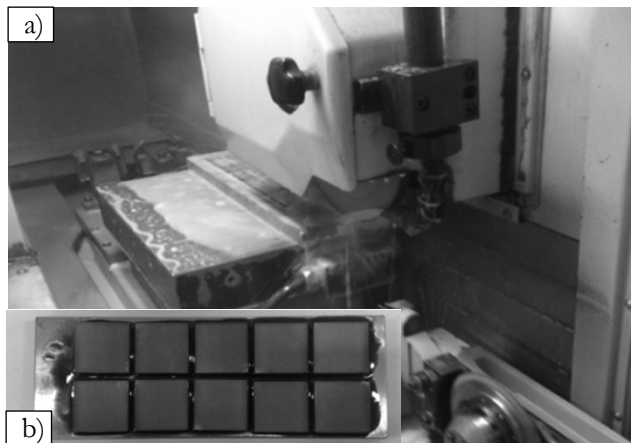


Abb. 5-2: a) Umfangs-Planschleifen b) gekittete Proben [jena05]

Die Schnittgeschwindigkeit v_c gibt bei diesem Verfahren die Geschwindigkeit des Pendeltisches an und a_{e-vor} die Zustellung während des Vorschleifens. Diese beiden Parameter werden während der Versuchsreihen konstant gehalten. Der Versuchsplan für das Schleifverfahren hat einen Zentrumsplan und wird 3-mal ausgeführt. Nach Gl. 5-1 ergeben sich so $m = 27$ Einzelversuche.

$$m = n(2^k + 1) \quad \begin{array}{l} \text{mit } k = 3 \text{ (Faktoren)} \\ \text{und } n = 3 \text{ (Wdh.)} \end{array} \quad \text{Gl. 5-1}$$

Für jede Wiederholung werden dieselben Proben (Kantenlänge 25 mm) erneut verwendet. Die Bestimmung der Oberflächenkenngrößen am Tastschnittmessgerät erfolgt nach jedem Durchlauf quer und längs zur Vorschubrichtung der Schleifbewegung.

Tabelle 5-3: Auflistung der Versuchsparameter für Umfangs-Planschleifen

Probe	FS-A01	FS-A02	FS-A03	FS-A04	FS-A05	FS-A06	FS-A07	FS-A08	FS-A09
VARIABLE PARAMETER (Versuchsplan)									
a_e [mm]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
a_p [mm]	0,1	0,1	3	3	0,1	0,1	3	3	1,5
v_f [m/min]	7,41	17,39	7,41	17,39	7,41	17,39	7,41	17,39	12,04
KONSTANTE PARAMETER									
Scheibe	Unwucht [mm/s]			v_c [m/s]			a_{e-vor} [mm]		
D126 C75 B52 ⁶	0,002			25			0,03		

Um den Einfluss der Parameter aus Tabelle 5-3 auf das Schleifergebnis zu ermitteln, werden die Zielgrößen nach dem vollständigen faktoriellen Versuchsplan ausgewertet. Im Diagramm in Abb. 5-3 sind die Auswirkungen der Einzelparameter und ihrer Kombinationen auf den arithmetischen Mittenrauwert R_a dargestellt.

Überschreitet ein Effekt den 99,9 %-Bereich, dann gilt sein Einfluss als hochsignifikant. Dies gilt in der vorliegenden Auswertung für den Einzelparameter a_p sowie für die Parameterkombinationen $v_f * a_e$ und $a_e * a_p$. Liegt ein Effekt – wie der der Parameterkombination $v_f * a_e * a_p$ – unterhalb von 95 %, dann hat er keinen Einfluss auf die Zielgröße. Im Bereich zwischen 95 % und 99 % gilt ein Effekteinfluss als indifferent, für dessen genaue Beurteilung mehr Daten not-

⁶ D126 kennzeichnet die Körnung, C75 die Konzentration und B52 die Bindung der Schleifscheibe

wendig sind (betrifft an dieser Stelle a_e und $v_f * a_p$). Bis 99,9 % (v_f) gilt der Effekteinfluss dann bereits als signifikant für den Prozess.

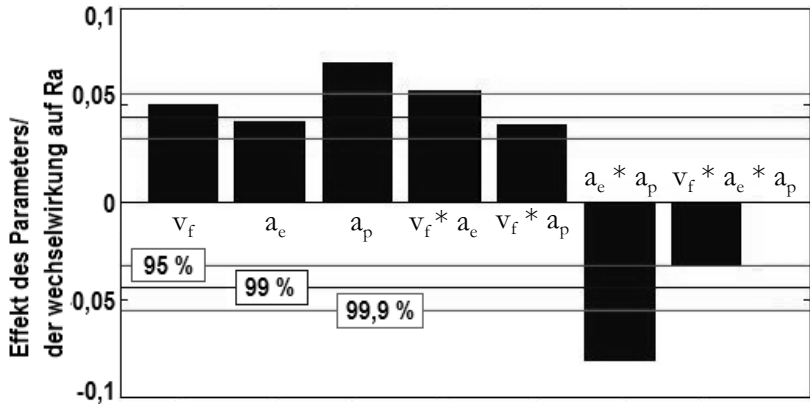


Abb. 5-3: Umfungs-Planschleifen - Effektdiagramm für den Oberflächenkennwert Ra [jena05]

Sobald Wechselwirkungen von Parametern einen hochsignifikanten Einfluss auf die Zielgrößen haben, empfiehlt sich ein Blick auf das Wechselwirkungsdiagramm. Damit kann die Wirkung der Parameter untereinander, bezogen auf das zu erreichende Ergebnis – also die Minimierung der Oberflächenrauheit – verdeutlicht und analysiert werden. Betrachtet man den Verlauf der grauen Linie in Abb. 5-4, so wird deutlich, dass Ra bei einer großen Eingriffsbreite a_e durch die Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit v_f abnimmt.

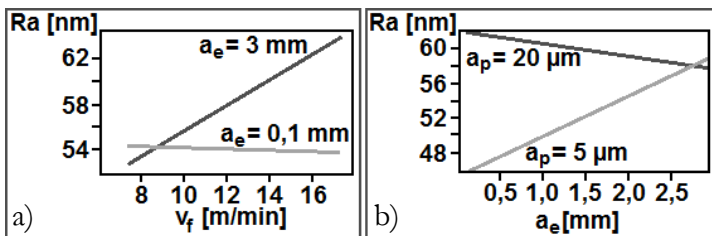


Abb. 5-4: Wechselwirkungsdiagramme auf den Rauheitswert Ra für a) $a_e * v_f$ und b) $a_p * a_e$

Die schwarze Linie verdeutlicht, dass der niedrige Ra-Wert auch bei einer geringen Eingriffsbreite erreicht wird. Es reduziert sich durch diese der Einfluss von v_f generell. Die Vorschubgeschwindigkeit kann so deutlich gesteigert werden. Die Wechselwirkung zwischen der Zustellung und der Eingriffsbreite in Abb. 5-4 b) verdeutlicht, dass mittels geringer Zustellung und geringer Eingriffsbreite ca. 40% niedrigere Rauheitswerte als bei einer hohen Zustellung mit geringer Eingriffsbreite erreicht werden. Das stimmt mit praktischen Erkenntnissen überein und führt zu dem – für das Schleifen üblichen – Mehrstufenprozess aus Vor- und Feinschleifen. Das Diagramm in Abb. 5-5 zeigt den Rauheitswert Ra, gemessen längs und quer zur Bearbeitungsrichtung. Die Werte für Ra schwanken zwischen $0,39 \mu\text{m}$ bis $0,7 \mu\text{m}$. Die Parameter mit der die Probe FS-A02 bearbeitet wurde, bringen mit einem Ra_{quer} von $0,49 \mu\text{m}$ das beste Ergebnis. Dies bestätigt auch die Rauheit in Längsrichtung mit $Ra_{\text{längs}} = 0,38 \mu\text{m}$ – ebenfalls der niedrigste Wert.

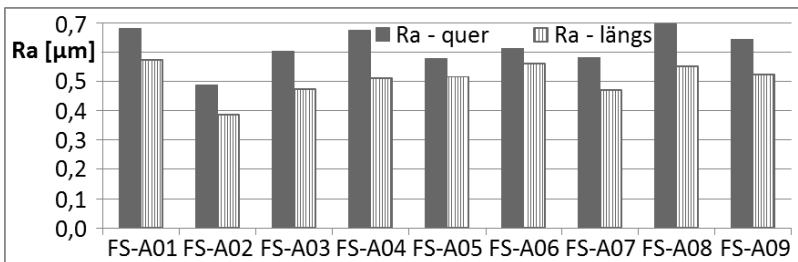


Abb. 5-5: Rauheit Ra der Proben aus den Versuchsreihen zum Umfangs-Planschleifen

Betrachtet man die Welligkeit der Oberfläche, so spiegelt sie in Querrichtung das Profil der Schleifscheibe und in Längsrichtung ihre Unwucht wieder. Die Auswertung in Abb. 5-6 zeigt, dass die Welligkeit, die aus der Unwucht resultiert, größer ausfällt, obwohl die Scheibe sehr gut abgerichtet ist. Auch in Hinsicht auf die Welligkeit schneidet Probe FS-A02 am besten ab. Es kann festgestellt werden, dass die gleichen Parameterkombinationen zur jeweils

besten und schlechtesten Rauheit und Welligkeit führen. Das ist hinsichtlich der Prozessoptimierung die wichtigste Erkenntnis. Die Verläufe von Rauheit und Welligkeit im Feld dazwischen weichen teilweise voneinander ab.

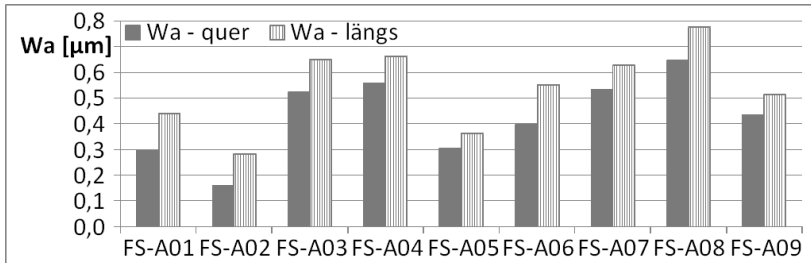


Abb. 5-6: Welligkeit W_a der Proben aus den Versuchsreihen zum Umfangs-Planschleifen

Das Form- und Profilschleifen an den CNC-Bearbeitungsanlagen stellt – wie beschrieben – die Grundlage für die Fertigung von $2\frac{1}{2}$ D-Konturen auf den Quarzglasproben dar. Es werden für diese Untersuchungen Proben der Größe $40 \times 40 \times 6 \text{ mm}^3$ verwendet. Die zum Einsatz kommenden Anlagen unterscheiden sich maßgeblich durch die Ultraschallunterstützung an der Ultrasonic 20 linear. Es handelt sich dabei um eine Spindel, die durch einen Ultraschallgenerator mit einer Nennfrequenz von $20 \dots 30 \text{ kHz}$, entsprechend der Resonanzfrequenz der jeweiligen Werkzeugeinheit, in mechanische Bewegungen (longitudinale Schwingungen) versetzt wird. Bei dieser Bearbeitung führt ein großer Teil der Wirkenergie zum stoß- bzw. schlagweisen Materialabtrag durch den Ultraschall. Die rotierende Bewegung des Werkzeuges dient vordergründig zum Entfernen der abgetragenen Werkstückpartikel aus der Wirkzone. [Vogt02] [DMG09]

Die Bearbeitung ohne Ultraschallunterstützung mit (maschinentechnisch bedingt) niedrigerer Drehzahl an der CNC-Fräsmaschine UWF 721H erhöht die Wahrscheinlichkeit von Makro- und Mikrorisse an den Werkstückkanten. Es ist zu erwarten, dass beim Vergleich dieser beiden Anlagen die Ergebnisse deutlich zu

Gunsten der ultraschallunterstützten Bearbeitung ausfallen. In Tabelle 5-4 sind die Bearbeitungsparameter aufgelistet. Das Verhältnis Probengröße zu Werkzeugdurchmesser erlaubt das Schleifen mehrerer Bahnen auf einer Probe, wobei jede Bahn eine neue Parameterkombination darstellt.

Tabelle 5-4: Auflistung der Versuchsparameter für das konventionelle CNC Form-Profil Schleifen

Bahn	1	2	3	4	5	6	7	8
VARIABLE PARAMETER (Versuchsplan)								
a_e [mm]	0,03	0,03	0,03	0,03	0,1	0,1	0,1	0,1
n_{Wkz} [min ⁻¹]	6000	6000	12000	12000	6000	6000	12000	12000
v_f [mm/s]	10	30	10	30	10	30	10	30
KONSTANTE PARAMETER								
a_p [mm]	Werkzeug							
4	Diamantschleifstift, galvanisch gebunden, Ø 4 mm, Körnung D64							

Da die statistischen Methoden in der vorangegangenen Versuchsreihe ihre Wirksamkeit und Aussagekraft bewiesen haben, sind für die nachfolgenden Versuchsreihen (CNC-Form-Profil Schleifen ohne und mit Ultraschallunterstützung) zwei statt drei Wiederholungen ausreichend. Die Ergebnisse des Zentrums punktes im vorangegangenen Versuchsplan liegen mit ihren Werten in der Mitte aller Ergebnisse (vgl. FS-A09 in Abb. 5-5 und Abb. 5-6), weshalb in den weiteren Schleifuntersuchungen auf ihn verzichtet wird. So reduziert sich der Versuchsaufwand auf je 16 Einzelversuche. Die Durchführung und Auswertung erfolgt dann in gleicher Weise wie beim Umfangs-Planschleifen und führt für das CNC-Form-Profil Schleifen (ohne Ultraschall) zum Effektdiagramm in Abb. 5-7.

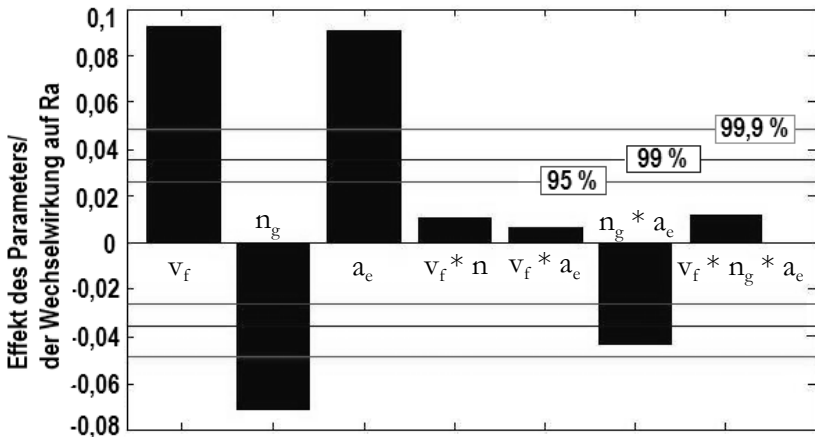


Abb. 5-7: CNC-Form-Profileschleifen - Effektdiagramm für den Oberflächenkennwert R_a [jena05]

Die Kombination der einzelnen Parameter spielt nur eine untergeordnete Rolle. Wesentlich wichtiger sind die Einzelparameter, da sie alle einen hochsignifikanten Einfluss haben. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Erhöhung der Drehzahl die Rauheit positiv beeinflusst, während sich die Steigerung von Vorschub und Eingriffsbreite negativ auswirken. Das Wechselwirkungsdiagramm (Abb. 5-8) veranschaulicht die Wirkung der Drehzahländerung. Wird n_g erhöht, dann sinkt die Rauheit, was sowohl bei kleinen als auch bei

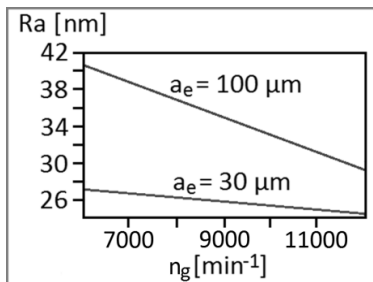


Abb. 5-8: Wechselwirkungsdiagramm für $n_g * a_e$ auf den Rauheitswert R_a

großen Eingriffsbreiten gilt. So kann das Vorschleifen mit großem a_e zur Prozesszeitreduzierung mit einer anschließenden Feinbearbeitung kombiniert werden, bei der a_e klein gewählt wird, womit sich die niedrigsten Werte bei der Oberflächenrauheit erreichen lassen.

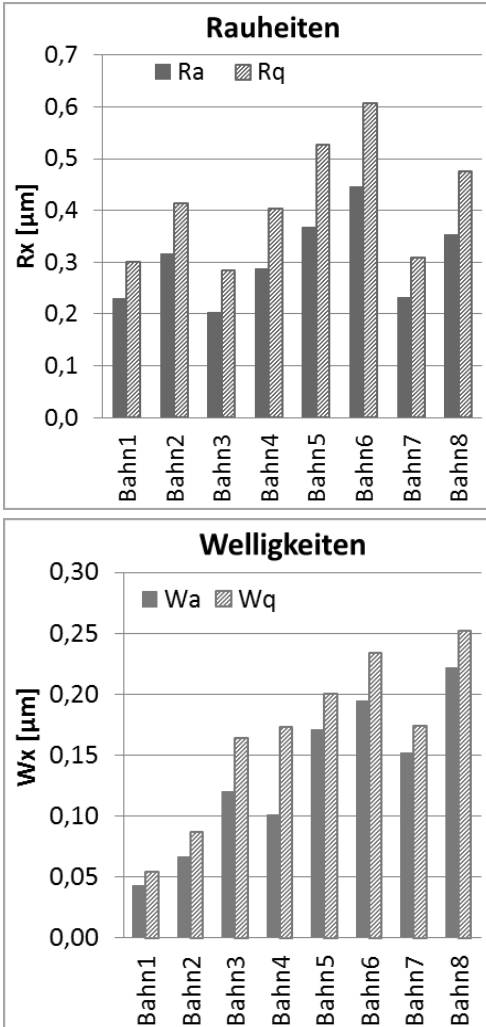


Abb. 5-9: Rauheit und Welligkeit der Proben aus den Versuchsreihen zum Form-Profilschleifen

Betrachtet man die Rauheits- und Welligkeitswerte in Abb. 5-9, welche jeweils den Mittelwert aus Durchlauf 1 und 2 darstellen, so wird auch hier die Wirkung der einzelnen

Parameterkombinationen deutlich. Die Bahnen, die mit niedrigem Vorschub gefertigt wurden (Bahn 1, 3, 7), weisen mit einem durchschnittlichen Ra von $0,22 \mu\text{m}$ die besten Rauheitswerte auf. Die in diesem Versuch ungünstigste Kombination war die der Bahn 6 mit $\text{Ra} = 0,45 \mu\text{m}$. Allerdings ist dieser schlechteste Wert gleich dem besten Wert aus dem Umfangs-Planschleifen. Auch die Ergebnisse der Welligkeiten sind z. T. sehr gut. Bahn 1 zeigt nach der Bearbeitung einen durchschnittlichen Wert

Wa von 40 nm , den bis dahin niedrigsten dieser Untersuchungen. Auch bei der Welligkeit ist der schlechteste gemessene Wert Wa

von 220 nm nicht viel größer als der beste Wert, der beim Umfangs-Planschleifen mit $W_a = 150$ nm erreicht wurde.

Die Parameter für das abschließend untersuchte ultraschallunterstützte Form-Profilschleifen sind in Tabelle 5-5 zusammengefasst. Die Werkstücke haben die gleiche Geometrie, und es wird die gleiche Bearbeitungsstrategie mit den gleichen variablen Parametern (in den gleichen Grenzen) angewendet wie beim konventionellen CNC-Form-Profilschleifen. Lediglich die Drehzahl muss zur Anpassung an die Maschine leicht verändert werden. Zu den konstanten Parametern kommt die longitudinale Ultraschallfrequenz f hinzu. Sie ist nicht veränderbar, da sie entsprechend dem Werkzeug eingestellt wird. So wird gewährleistet, dass an der Stirnfläche des Werkzeuges die größte Amplitude und somit die größtmögliche Wirkenergie herrscht.

Tabelle 5-5: Auflistung der Versuchsparameter für das ultraschallunterstützte Form-Profilschleifen

Bahn	1	2	3	4	5	6	7	8
VARIABLE PARAMETER (Versuchsplan)								
a_c [mm]	0,03	0,03	0,03	0,03	0,1	0,1	0,1	0,1
n_{Wkz} [min ⁻¹]	5000	5000	10000	10000	5000	5000	10000	10000
v_f [mm/s]	10	30	10	30	10	30	10	30
KONSTANTE PARAMETER								
a_p [mm]	f [kHz]		Werkzeug					
4	24,1		Diamantschleifstift, galvanisch durchsetzt, Ø 4 mm, Körnung D64					

Die Ergebnisse dieses Schleifverfahrens (vgl. Abb. 5-10) zeigen, dass damit die höchste Oberflächenqualität innerhalb der Untersuchungen zum Schleifen erreicht werden kann. Die Parameterkombination der Bahn 7 ermöglicht eine Rauheit $R_a = 70$ nm und charakterisiert damit die beste geschliffene Oberfläche. Im

direkten Vergleich mit den Werten der konventionell formprofilgeschliffenen Proben ist der Wert der Rauheit bis zu 6,4-

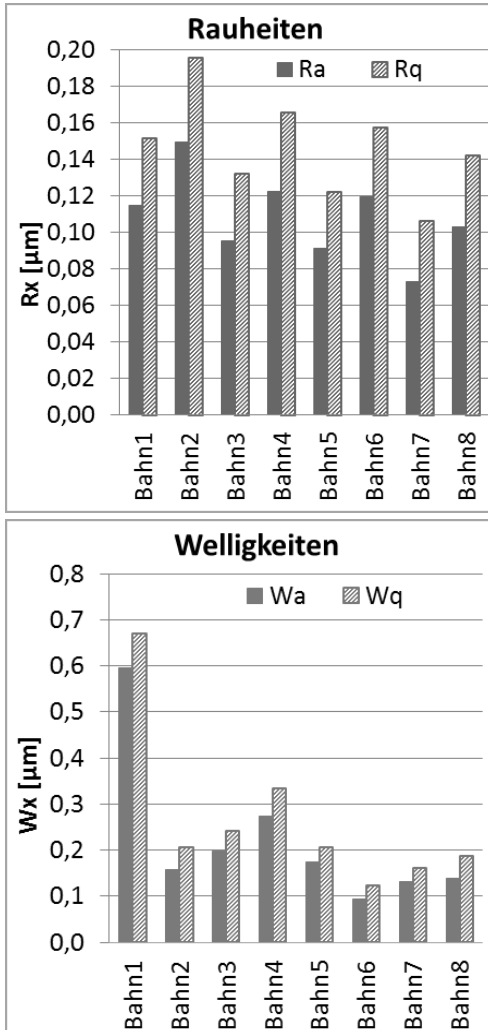


Abb. 5-10: Rauheit und Welligkeit der Proben aus den Versuchsreihen zum ultraschallunterstützten Form-Profil schleifen

fach geringer. Damit wird deutlich, welcher großer Vorteil aus dem Einsatz der neueren Maschine mit Ultraschallunterstützung resultiert. Die Welligkeitswerte unterscheiden sich innerhalb der Versuchsreihe recht deutlich voneinander und zeigen so den Einfluss der unterschiedlichen

Parameterkombinationen. Bahn 1 und 4 weisen die schlechtesten Werte, Bahn 6 die besten auf. Den größten Einfluss hat an dieser Stelle die Eingriffsbreite, die auf den Bahnen 5 bis 8 gering ist. Weiterhin zeigt sich, dass hinsichtlich der Welligkeit eine niedrigere Drehzahl und bezüglich der Rauheit eine höhere Drehzahl von Vorteil ist.

Zusammenfassend stellt die Tabelle 5-6 die un-

tersuchten Schleifverfahren und deren wichtigste Ergebnisse gegenüber. Hinsichtlich der erreichbaren Oberflächenrauheit ermöglicht das ultraschallunterstützte Form-Profilschleifen die besten Ergebnisse. Das Umfangs-Planschleifen bietet zwar den Vorteil, dass mehrere Proben zur gleichen Zeit gefertigt werden können, diese müssen aber eben sein und es hat weiterhin hinsichtlich der Oberflächenqualität deutliche Defizite gegenüber den CNC-Verfahren. Deren Rauheitswerte ordnen sich in die Probengruppe C der geläphten Proben ein. So können die Ergebnisse, die auf geläphten C-Proben durch die anschließende LSP erreicht werden, sehr gut auf die Qualitätswerte übertragen werden, die auf den schleifend vorgearbeiteten Proben erreichbar sind.

Tabelle 5-6: Vergleich der Schleif-Bearbeitungsverfahren und ihre Ergebnisse

	Umfangs-Planschleifen	Form-Profilschleifen	US Form-Profilschleifen
Maschine	Zirsch & Baltrusch 8,30 CNC	Hermle UWF 721H	DMG 20 linear
Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Synchrones Planschleifen mehrerer Platten • Tiefschleifen (Nuten) 	<ul style="list-style-type: none"> • Planfräsen (große Schleifwerkzeuge) • 2½ D Fräsen 	<ul style="list-style-type: none"> • Planfräsen (große Schleifwerkzeuge) • 3D Fräsen
Werkzeug	Schleifscheibe D126 C75 B52, Ø250 mm	Galvanisch gebundener Schleifstift D64, Ø4 mm	Galvanisch durchgesetzter Schleifstift D64, Ø4 mm
v_c [m/s]	25 - 35	1,25 – 2,5	1,05 – 2,1
Minimaler R_a [μm]	0,36	0,14	0,053
Minimaler W_a [μm]	0,109	0,047	0,084

5.3.4 Form- und Profilschleifen von 2½D Konturen und Makrostrukturen

Für diese Bearbeitung eignen sich nur die CNC Form- und Profilschleifverfahren. In den ersten Untersuchungen geht es darum, eine Testgeometrie zu fertigen, die auch komplexe Strukturen enthält. Es wird damit untersucht, in wie weit verschiedene programmierte Fertigungszyklen wie Kreistaschen, Nuten und Vierecktaschen mit verschiedenen Tiefen im Quarzglas fertigbar sind. Zum einen geht es darum, die Bearbeitungszeit zu minimieren, zum anderen wird das Ausbrechen der Kanten untersucht. Die Kontur in Abb. 5-11 wird dabei so programmiert, dass immer im Gleichlauf geschliffen wird, damit die Kanten so wenig wie möglich belastet werden und eine höhere Oberflächengüte erreicht wird. Die Kanten der Kontur werden anschließend unter einem Messmikroskop auf Kantenausbrüche untersucht. Für diese Bearbeitung werden die jeweils besten Parameterkombinationen aus den Ergebnissen der Statistischen Versuchsplanung verwendet. Sie sind in Tabelle 5-7 zusammengefasst.

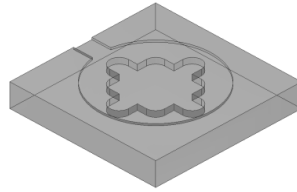


Abb. 5-11: Modell der 2½D Kontur

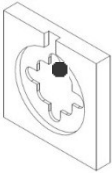
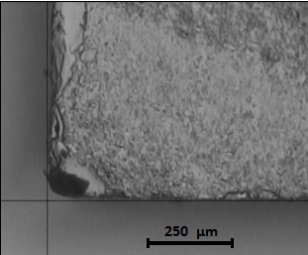
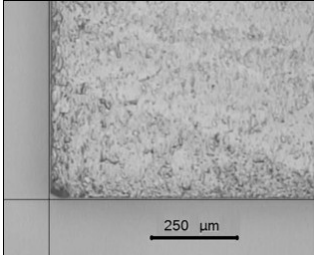
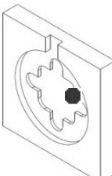
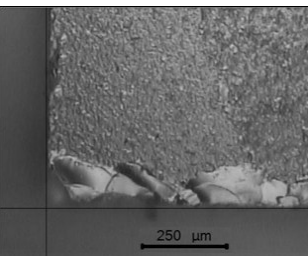
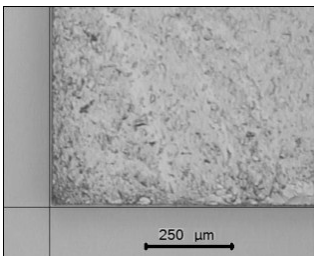
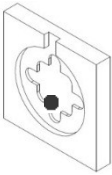
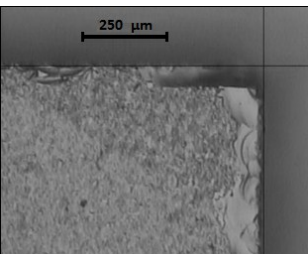
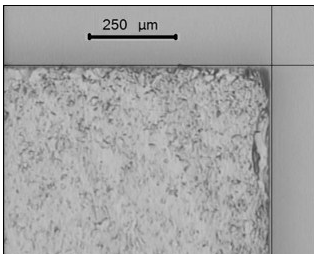
Tabelle 5-7: Auflistung der Versuchsparameter für die Fertigung der 2½ D Kontur

CNC-Verfahren	konventionell		ultraschallunterstützt	
	Schleifen		Schleifen	
	vor	fein	vor	fein
a_c [mm]	0,1	0,03	4	4
v_r [mm/min]	30	10	280	10
v_c [m/s]	2,5		1,2	2,1
f [kHz]			24,1	

Werkzeug	D64 Diamantschleifstift galvanisch gebunden, Ø 4 mm	D64 Diamantschleifstift galvanisch durchsetzt, Ø 4 mm
<i>t</i>_{Bearbeitung} [min]	150	50

Auffallend ist die Verkürzung der Bearbeitungszeit, die durch das ultraschallunterstützte CNC Schleifen erreicht werden kann. Speziell die Ultraschallunterstützung während des Vorschleifens lässt, im Vergleich zum konventionellen Schleifen, höhere Vorschubgeschwindigkeiten zu. Bei der Betrachtung der Kanten in Tabelle 5-8 ist die gleichzeitig auftretende Verbesserung ihrer Qualität zu sehen. Die Fertigung der Kontur gestaltet sich schwierig, da bisher kaum Erfahrungswerte zur Bearbeitung von Quarzglas vorliegen. Durch weitere Versuche müssen daher vor allem für die Bearbeitung an einer herkömmlichen CNC-Fräsmaschine optimale Parameter ermittelt werden. Auch die Möglichkeiten der ultraschallunterstützten Bearbeitung wurden noch nicht voll ausgeschöpft. Diesbezügliche Untersuchungen sind jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Tabelle 5-8: Vergleichende Betrachtung der Kanten der geschliffenen 2 ½ D Konturen [jena05]

CNC-Verfahren	konventionell	ultraschallunterstützt
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> • Kanten im Gleichlauf geschliffen • grobe Ausbrüche entlang der Nuten • Kantenspitzen gebrochen und verrundet 	<ul style="list-style-type: none"> • Kanten im Gleichlauf geschliffen • kaum Ausbrüche entlang der Nuten • Kantenspitzen kaum gebrochen
Position		
		
		
		

5.4 Laserstrahlpolieren

5.4.1 Erprobung und Optimierung der Temperaturerfassung

Die Versuche zum Laserstrahlpolieren finden, soweit nicht anders vermerkt, stets auf den geläppten Oberflächen der Proben $25 \times 25 \times 3,5 \text{ mm}^3$ statt⁷. Weiterführende Untersuchungen zu verschiedenen Probengrößen und Probenoberflächen werden gesondert behandelt.

Da die Temperaturerfassung zur Prozesskontrolle und –optimierung eminent wichtig ist, wird sie extra konzipiert und optimiert. Es wird das schon mehrfach genannte Pyrometer IE 120/51-L der Firma IMPAC mit einer festen Messwellenlänge von $5,14 \mu\text{m}$, einem Messbereich von $500 \dots 2500^\circ\text{C}$ und dem Messfleckdurchmesser von $1,4 \text{ mm}$ bei einem festen Messabstand von 250 mm verwendet. Der Emissionsgrad für das verwendete Quarzglas HSQ300 der Firma Heraeus wurde in speziell durchgeführten Messungen mittels Kalibrierstrahler bestimmt [jena04]. Abb. 5-12 zeigt den daraus ermittelten Kurvenverlauf für ε .

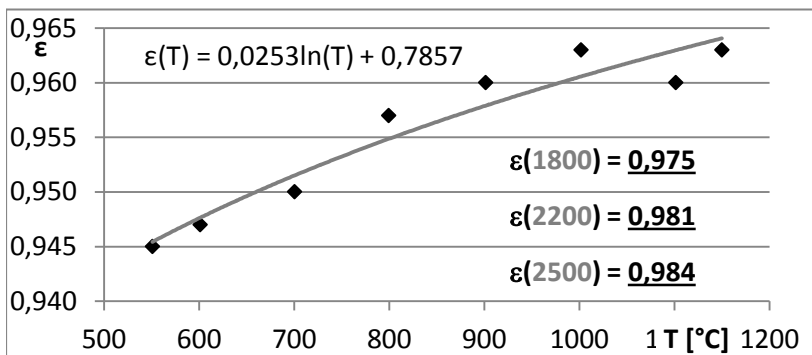


Abb. 5-12: Ermittelter Emissionsgrad für HSQ300

Der Kalibrierstrahler ist nur für Temperaturen bis 1200°C ausgelegt. Der weitere Kurvenverlauf wird durch eine entsprechende

⁷ Die Probendicke variiert um maximal $\pm 0,5 \text{ mm}$.

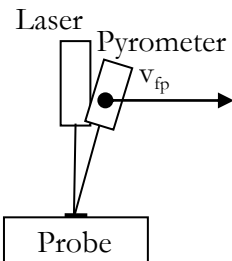
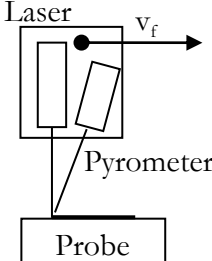
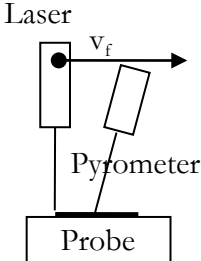
Trendfunktion mit Sättigungsgrenze extrapoliert. Für die angestrebten Poliertemperaturen zwischen 1900...2200°C ergibt sich damit für ε der Wert 0,98. In dieser Größenordnung entspricht er den Werten, die in einigen Literaturstellen für diese Wellenlänge und das Material Glas angegeben werden. Das Pyrometer bietet nicht die Möglichkeit, ε als temperaturabhängige Größe bzw. auf mehr als 2 Dezimalstellen genau einzustellen.

Vor Beginn der Temperaturerfassung während der LSP, wird zunächst die Eignung des angestrebten Verfahrens anhand einfacher Messaufgaben ermittelt. Hierfür wird der 2 kW DC020 Laser der Rofin-Sinar Laser GmbH verwendet. Die Oberflächen der Quarzglasproben befinden sich 100 mm unterhalb der Fokusslage des Laserbearbeitungskopfes, wodurch sich ein Strahldurchmesser von 7,1 mm ergibt⁸. Die Abweichung von +0,2 mm zum Durchmesser des später zur LSP verwendeten 1,5 kW SM1500P Lasers der FEHA GmbH ist vernachlässigbar. Mit dem Laserstrahl werden Bahnen und Punkte mit geringer Leistung bestrahlt, die Temperatur gemessen und die zugehörige Oberflächenveränderung erfasst. Der Verzicht auf ein Scansystem in dieser Untersuchung bedingt den Wegfall der Scangeschwindigkeit v_s . Hier wird der Laserstrahl nur durch den Vorschub v_f (100... 220 mm/min) bewegt. Der muss höher ausfallen als bei der Verwendung eines Scanners. Weiterhin ist eine Beschränkung des untersuchten Leistungsbereiches auf 90...180 W (5...9 %) notwendig. In Tabelle 5-9 sind die drei Konzepte, die zur Evaluierung der Temperaturmessung mittels Pyrometer umgesetzt werden, dargestellt.

Für alle 3 Konzepte muss beachtet werden, dass die Temperatur über den Messfleckdurchmesser des Pyrometers integriert wird (vgl. Abschnitt 3.4.3 und Abb. 5-13). Das hat unterschiedlich starke Auswirkungen auf die Differenz von Mess- und Realtemperatur.

⁸ In zusätzlicher Strahlanalyse ermittelt.

Tabelle 5-9: Konzepte der Temperaturerfassung

a)	b)	c)
stationärer Laserstrahl, punktförmige Oberflächenbestrahlung, Pyrometer wird bewegt → Messfleck läuft durch bestrahlten Bereich	Laserbearbeitungskopf und Pyrometer werden gemeinsam über Probe bewegt → Messfleck bleibt in Lasersstrahlmitte	Pyrometer steht still auf Bahnmitte (Probenmitte), Laserbearbeitungskopf wird bewegt → Messfleck wird vom Laserstrahl durchlaufen
vorrangige Aufgabe:		
Erfassung der Temperaturverteilung in und um den laserbestrahlten Oberflächenbereich.	Ermittlung des Temperaturverlaufs zur Optimierung (und ggf. späteren Steuerung) der Politur.	Beobachtung der Temperaturentwicklung zum Vergleich mit der Simulation.
Skizze:		
		

Konzept **a)** soll Aufschluss darüber geben, wie sich die Temperatur unmittelbar im und um den Einkoppelbereich des Laserstrahls bzw. im Erweichungsbereich verhält. Um zu gewährleisten, dass der Pyromettermessfleck mittig durch den Strahl verläuft, wird der He-Ne-Positionslaser der Anlage so fokussiert, dass sein Durchmesser dem des Pilotlaserstrahls vom Pyrometer entspricht und mit diesem in Deckung gebracht. Die Strahlen des CO₂- und des

HeNe-Lasers sind coaxial justiert. Nun wird das Pyrometer und damit sein Messfleck mittels der CNC-gesteuerten Tischachsen der CO₂-Laseranlage durch den Strahl verfahren (Abb. 5-13).

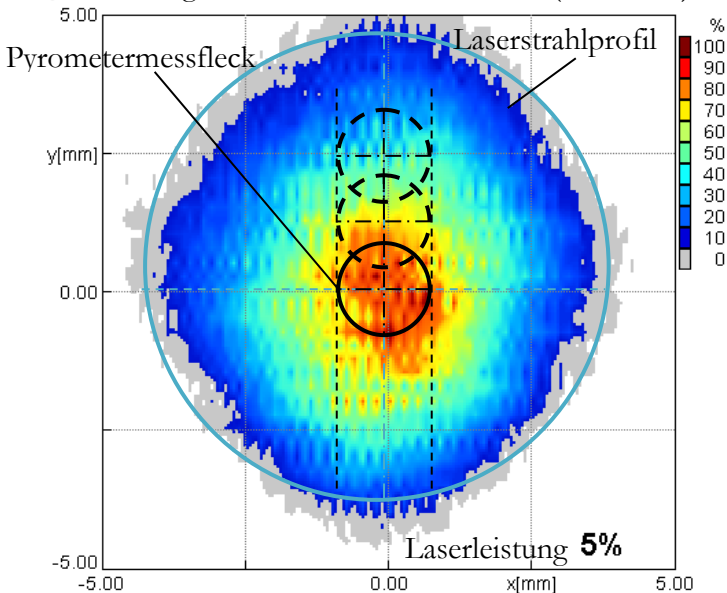


Abb. 5-13: Schema der Positionierung Pyrometer : Laser (Maßstab 1,4 : 7,1)

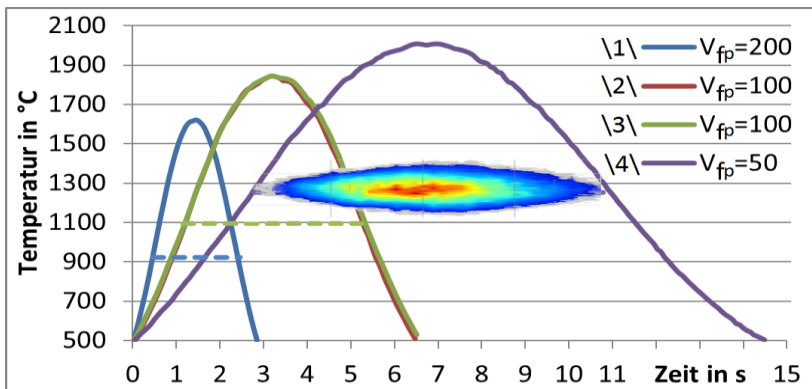


Abb. 5-14: Temperaturverlauf im/um Wechselwirkungsbereich Quarzglasoberfläche-Laser

In Abb. 5-14 sind vier Temperaturkurven bei 3 verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten des Pyrometers (v_{fp}) zu sehen. Die Wiederholung bei $v_{fp} = 100 \text{ mm/min}$ dient als Nachweis der Reproduzierbarkeit. Die unterbrochenen waagerechten Linien symbolisieren den Bereich des Laserstrahles. Zur Veranschaulichung wurde die Kurve \4\ mit der Falschfarbendarstellung des Laserstrahlprofils überlagert.

Zunächst wird deutlich, dass der Laserstrahl die Messwerterfassung des Pyrometers nicht beeinflusst. Es ist keinerlei Unstetigkeit der Temperaturkurven im Bereich des Überganges von unbestrahlter zu bestrahlter Oberfläche zu erkennen. Auch innerhalb des bestrahlten und zum Teil erweichten Bereiches verläuft das Temperaturprofil gleichmäßig. Die leichten Wellen resultieren aus Schwingungen des verfahrenen Pyrometers. Weiterhin ist zu beobachten, dass bei niedrigerer Vorschubgeschwindigkeit des Pyrometers die Materialtemperatur ansteigt. Da die Laserstrahlung bei langsamerem Vorschub des Pyrometers länger auf das Material einwirkt, wird mehr Energie eingebracht, was auf Grund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Quarzglas zu stärkerer Erwärmung des bestrahlten Bereichs führt. Betrachtet man die bestrahlte Oberfläche in Abb. 5-15, ist das Ergebnis dieser Erwärmung deutlich erkennbar. Die Bereiche, in denen die Oberfläche offenbar beeinflusst (an- und aufgeschmolzen) wurde, sind unter allen Bedingungen für v_{fp} kleiner oder maximal gleich dem Strahldurchmesser. Trotzdem gibt es Unterschiede in der Wechselwirkung. Bereich \1\ zeigt praktisch keine Glättung, hier wurden lediglich die höchsten Profilsitzen auf der Quarzglasoberfläche leicht abgerundet. Die Bereiche \2\ und \3\

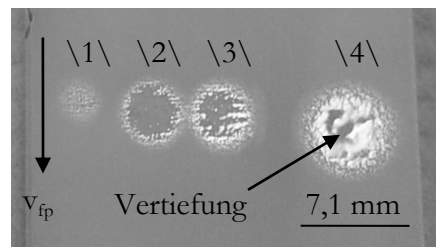


Abb. 5-15: Ergebnis Konzept a)

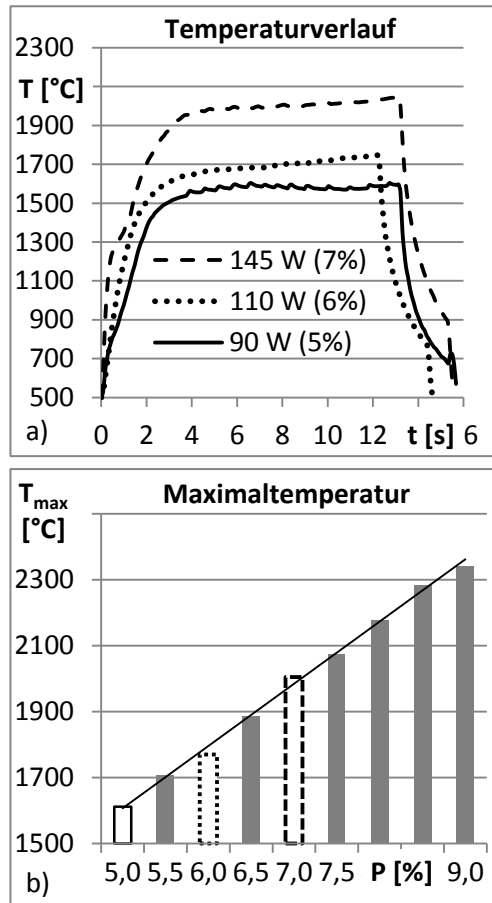
sind gleich und weisen geglättete Flächen auf. Im Bereich \4\ ist bereits eine Vertiefung sichtbar, welche durch Verdampfung entstanden ist, die während der Bearbeitung beobachtet werden konnte. Die ermittelte Maximaltemperatur von 2000°C nach 7 s Einwirkdauer gibt dabei nur den Zeitpunkt wieder, zu dem das Pyrometer den Mittelpunkt des Laserstrahls passiert. Die Strahlung wirkt auch danach noch weiter, wodurch die Temperatur ansteigt und die Verdampfung zunimmt. Außerdem handelt es sich bei diesem Maximalwert um eine (wie zuvor beschrieben) über den Messfleck integrierte Temperatur. Prinzipiell zeigen die Ergebnisse aus Konzept **a)**, dass die Temperaturverteilung über den Strahlquerschnitt gleichförmig verläuft, die Laserstrahlung das Pyrometer nicht beeinflusst und dass die Möglichkeit besteht, bei großflächiger und zeitlich angepasster Bestrahlung (Bereiche \2\ und \3\) die Quarzglasoberfläche zu erweichen ohne (sichtbar) Material abzutragen.

Das Konzept **b)** ist das favorisierte Messverfahren für die späteren experimentellen Untersuchungen der LSP mit Scanner. Hier werden Pyrometer und Laser so positioniert, dass sich ihre Lage zueinander nicht verändert. Die zu polierende Oberfläche wird unter beiden hindurch bewegt. Beim späteren Einsatz des Scanners erfährt der Laserstrahl zusätzlich eine sehr schnelle, linienförmige Auslenkung. Der Messfleck des Pyrometers befindet sich dann mittig (bei 12,5 mm auf den Proben der Kantenlänge 25 mm) auf der „Polierlinie“ und wird durch v_f mitbewegt. Für die Erprobung des Messkonzeptes reicht aber zunächst das Mitführen des Pyrometermessflecks (durch v_f) im Laserstrahl (ohne Scannereinsatz) aus. Abb. 5-16 a) zeigt den Temperaturverlauf für 3 Bahnen bei 3 verschiedenen Leistungen. Die Bahnlänge beträgt 20 mm und die Vorschubgeschwindigkeit 100 mm/min.

Wie zu erwarten, steigt die Temperatur mit zunehmender Leistung. Außerdem bestätigt sich die bereits gewonnene Erkenntnis,

dass die Strahlung eine gewisse Zeit einwirken muss, bis sich eine relativ konstante Temperatur durch ein Gleichgewicht aus Energieabsorption und Wärmeableitung im Probenmaterial einstellt. Daraus resultiert der nicht senkrechte Temperaturanstieg und -abfall. Im Verlauf und vor allem gegen Ende der Bestrahlung verzeichnet man einen leichten Temperaturanstieg. Dieses Verhalten wird beim flächigen Polieren verstärkt beobachtet, wenn sich die „Polierlinie“ dem Probenende nähert und ein Wärmestau entsteht. Nach dem Abschalten der Strahlung kühlt das Quarzglas sehr schnell ab. Der Anstieg der Maximaltemperatur mit zunehmender Leistung in Abb. 5-16 b) verläuft linear.

In weiteren Untersuchungen und in der Simulation hat sich gezeigt, dass der Zusammenhang zwischen der Vorschubgeschwindigkeit und der Temperatur nur in bestimmten Bereichen linear ist. Auf diese Bereiche werden die experimentellen Untersuchungen wei-



testgehend begrenzt. Über einen großen Bereich hinweg betrachtet, ist der Verlauf der Temperatur bei gleichmäßig verändertem Vorschub logarithmisch (vgl. Abb. 5-17).

Das bedeutet: Wird die Vorschubgeschwindigkeit zu gering gewählt, steigt die Temperatur extrem stark an. Ist er dagegen zu groß, kann die Energie der Laserstrahlung nur unvollständig in die Oberfläche eingebracht werden, es findet kaum eine Erwärmung statt. Dies liegt in der Wärmeleitfähigkeit (und ihrer Nichtlinearität bezüglich der Temperatur) des Quarzglases begründet [Hild10].

Das Konzept **c)** ist für eine andauernde Prozessüberwachung und -kontrolle ungeeignet. Es stellt nur eine Momentaufnahme der Bearbeitung dar und dient dem Vergleich der gemessenen Temperaturwerte mit denen aus der Simulation.

Die Temperaturerfassung mittels Wärmebildkamera an der Laseranlage ist wesentlich unkomplizierter. Während das Pyrometer immer genau auf den Laserstrahl ausgerichtet werden muss, ermöglicht die Thermografie dank der flächigen Temperaturerfassung eine sehr einfache Positionierung der Kamera zum Bearbeitungsraum. Die Kamera konnte jedoch erst am Ende der Untersuchungen eingesetzt werden (ab Zeitpunkt der Anschaffung). Damit bestand die Notwendigkeit zur Durchführung vergleichender Versuche zur Einordnung der bis dahin erfolg-

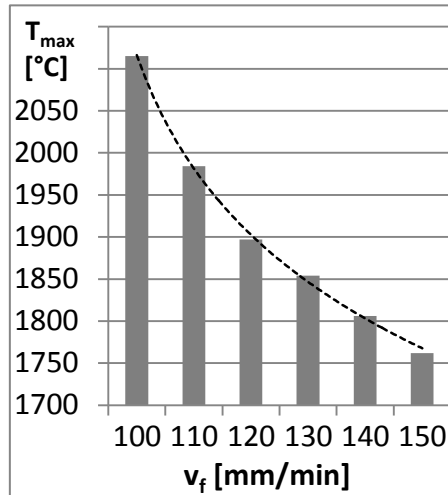


Abb. 5-17: Messfleck im Laserspot - Maximaltemperatur bei variablem Vorschub

ten Pyrometermessungen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind auch für zukünftige Anwendungen der LSP wichtig. Ein Thermografie-Messsystem ist zu teuer und die Datenfülle zu groß, um damit sinnvoll einen dauerhaft laufenden Prozess zu überwachen. Wenn die Zusammenhänge zwischen Temperaturverteilung und linienförmig gemessenen Temperaturen bekannt sind, kann der Prozess sehr gut mittels Pyrometer überwacht und ggf. gesteuert werden. Nach Voruntersuchungen wird das gleiche Messkonzept wie bei der Pyrometrie, d. h. nach Konzept b), die Kamera steht fest zum Laserstrahl, gewählt. Das erleichtert die Auswertung der Aufnahmen. Wie die Ergebnisse in Abschnitt 6.5.4 zeigen, ist es ausreichend, vergleichende Untersuchungen mit nur wenigen, ausgewählten Versuchen durchzuführen.

5.4.2 Versuchsplanung für das Laserstrahlpolieren

Im Rahmen der Untersuchungen mit Hilfe der Statistischen Versuchsplanung werden die Parameter Laserleistung P , Vorschub v_f und Scangeschwindigkeit v_s hinsichtlich ihres Einflusses auf Rauheit, Materialabtrag und Temperatur untersucht. Der Strahldurchmesser ist, wie in 4.2.3 bereits dargestellt, durch die Defokussierung auf 6,9 mm festgelegt. Es wird die Verfahrensbewegung „Zick-Zack“ gewählt. Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern können durch die Statistische Versuchsplanung ebenso ermittelt werden wie die Signifikanz ihrer Einflüsse auf die zu optimierenden Zielgrößen. Das Parameterfeld enthält die Grenzwerte, die in Voruntersuchungen bereits zu vielversprechenden Ergebnissen geführt haben oder die als vielversprechend gelten. Es wird zunächst für jede Ausgangsrauheit (Gruppen A-C) ein vollfaktorieller Versuchsplan mit Zentrumspunkt und einmaliger Wiederholung aufgestellt. Die Tabelle 5-10 zeigt die Faktorstufen der 3 untersuchten Parameter in den 3 Rauheitsgruppen.

Tabelle 5-10: Parametergrenzen eines Versuchsplanes für das Laserstrahlpolieren

	Gruppe A (1,6>Ra>0,8µm) ~ (2,0>Rq>1,0µm)		Gruppe B (0,8>Ra>0,4µm) ~ (1,0>Rq>0,5µm)		Gruppe C (0,4>Ra>0,2µm) ~ (0,5>Rq>0,3µm)	
Leistung P [%]	10	25	10	25	15	25
Vorschub v_f [mm/min]	5	15	5	15	5	15
Scangeschw. v_s [mm/s]	900	1500	900	1500	900	1500

Für die gesamte Statistische Versuchsplanung und -auswertung der LSP wird die Software JMP® 8 von SAS Institute Inc. verwendet. Mit diesem Programm wird zunächst der Versuchsplan für alle drei Probengruppen in den vorgegebenen Grenzwerten erstellt.

Tabelle 5-11: Ausschnitt aus Versuchsplan 1, Gr. C

Muster	P [%]	v_f [mm/min]	v_s [mm/s]
– + –	15	15	900
+ + –	25	15	900
+ – –	25	5	900
– + +	15	15	1500
– – –	15	5	900
0 0 0	20	10	1200
– – +	15	5	1500
+ – +	25	5	1500
+ + +	25	15	1500

Tabelle 5-11 zeigt den Plan für die Probengruppe C (ohne Wiederholung). In vollfaktoriellen Plänen auf zwei Stufen steht „+“ für den Maximal-, „-“ für den Minimalwert und „0“ für den Zentrumsunkt. Anhand des Musters in Spalte 1 ist die Faktorstufenkombination für die einzelnen Versuche zu sehen, wobei zur leichteren Umsetzung im Experiment und zur Übersichtlichkeit in der Auswertung zusätzlich die tatsächlichen Parameterwerte angegeben sind. Die Pläne für die Probengruppen A und B gleichen dem der Gruppe C, unterscheiden sich lediglich in den Stufen der Leistung *P*. Mit dem Zentrumsunkt und der Wiederholung ergeben sich 18 Einzelversuche pro Probengruppe.

Die Ausgangsgrößen Rauheit (Welligkeit) und Masse werden, wie bereits erläutert, messtechnisch erfasst. Die Temperaturmessung und -aufzeichnung erfolgt kontinuierlich in der Mitte der „Polierlinie“ mittels Pyrometer (siehe Abschnitt 4.2.1 und 5.4.1), wobei zunächst der Maximalwert der Messung als Zielgröße ausgewertet wird.

Alle 54 Versuche werden nacheinander, unter vergleichbaren Bedingungen mit gleicher Einstellung und Positionierung des Pyrometers und unter strengster Einhaltung der randomisierten (zufällig strukturierten) Versuchspläne durchgeführt.

5.4.3 Ergebnis der Laserstrahlpolitur in den Probengruppen A, B und C

Die oben beschriebenen Untersuchungen auf Basis der statistischen Versuchsplanung dienen unter anderem dazu, den Einfluss der Ausgangsoberfläche (speziell der Rauheit) auf das Ergebnis der LSP zu ermitteln. Damit wird zugleich festgelegt, welche Ausgangsrauheit als polierbar gelten kann. In den nacheinander durchgeführten 54 Versuchen wird die jeweils angezeigte Maximaltemperatur ausgewertet. Nach dem Kühlen der laserbestrahlten Proben erfolgen das Wiegen und die Messung der erzielten Oberflächenqualität am Tastschnittmessgerät. Bei der Ermittlung der Oberflächenkennwerte wird, wie schon beim Schleifen, in Quer- und Längsrichtung (zur Vorschubrichtung) unterschieden.

Es haben sich jedoch keine richtungsabhängigen Unterschiede ergeben. Die Differenz beider Werte ist zu gleichen Teilen positiv und negativ und stets ein Bruchteil des Mittels beider Werte. Deshalb wird nur dieser Mittelwert aus Längs- und Querrichtung in der Auswertung verwendet. Für die Analyse des Einflusses der Parameter auf die Oberflächenqualität werden die Oberflächenkennwerte auf R_a reduziert. Das ist notwendig, da sonst für jede Oberflächenkenngröße ein eigenes Modell erstellt werden müsste. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die anderen Rauheits-Kenngrößen analog zu R_a verhalten. (Durch die späteren Untersuchungen und zugehörigen Oberflächenmessungen wird das bestätigt.) Die Werte für die Oberflächenrauheit R_a und den Materialabtrag MA werden zusammen mit den Temperaturen zur Auswertung in die Software JMP® eingegeben. Anhand ausgewählter Ergebnisse werden nachfolgend die Möglichkeiten der Ergebnisbe- und -verwertung aufgezeigt. Die Ergebnisse aller Gruppen werden mit denselben statistischen Werkzeugen analysiert. Diese Werkzeuge erfüllen unterschiedliche Aufgaben.

Um Beziehungen zwischen Variablen (Faktoren) und Zielgrößen (y_i) feststellen zu können, bedient man sich der Regressionsanalyse. In der vorliegenden Untersuchung wird dabei die „Methode der kleinsten Quadrate“ – das mathematische Verfahren zur Ausgleichsrechnung – angewendet. Auf genaue mathematische Zusammenhänge wird nur dann eingegangen, wenn dies zum Verständnis wichtig ist. In allen anderen Fällen sei auf die umfangreiche Fachliteratur (z.B. [Klep08]) verwiesen.

Für die statistische Versuchsauswertung ist es wichtig, dass die Standardabweichung unabhängig von der Zielgröße y_i (also den Messwerten) ist. Zur Überprüfung werden im Diagramm in Abb. 5-18 die Residuen gegen die vorhergesagte Zielgröße abgetragen. Residuen sind die Abweichung ($y_i - \hat{y}_i$) der Messwerte (wobei y_i = Zielgröße, \hat{y}_i = Schätzwert) von der Regressionsgeraden. Sollte ein zur Horizontalen symmetrisches Muster erkennbar sein, dann besteht

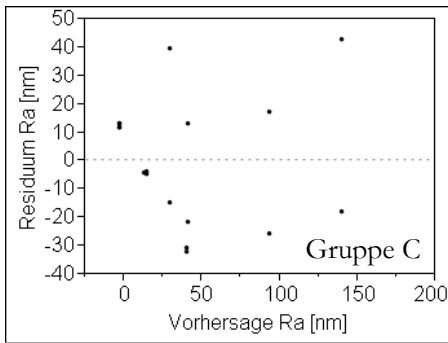


Abb. 5-18: Residuum über Vorhersagewert Ra

Die Diagramme in Abb. 5-19 verdeutlichen die Anpassung des Modells für die Zielgröße Ra in Gruppe B und C (A gleicht B und C). Es gilt: Je näher die Punkte an der diagonalen Regressionsgeraden liegen, desto besser ist die Anpassung [SASI09].

Die Kenngröße r^2 (rSquared) entspricht dem Bestimmtheitsmaß B , durch welches die Anpassung des Modells mathematisch erklärt wird. Es gilt, je größer der Anteil der Summe der quadratischen Abweichungen der durch die Regressionsgerade erklärt wird, ist, umso besser erfolgt die Anpassung [Klep08]:

eine Abhängigkeit der Standardabweichung von der Zielgröße, und das Modell wäre für diese Zielgröße ungenügend. In den durchgeführten Auswertungen wird dies für keine Zielgröße in keiner Gruppe beobachtet.

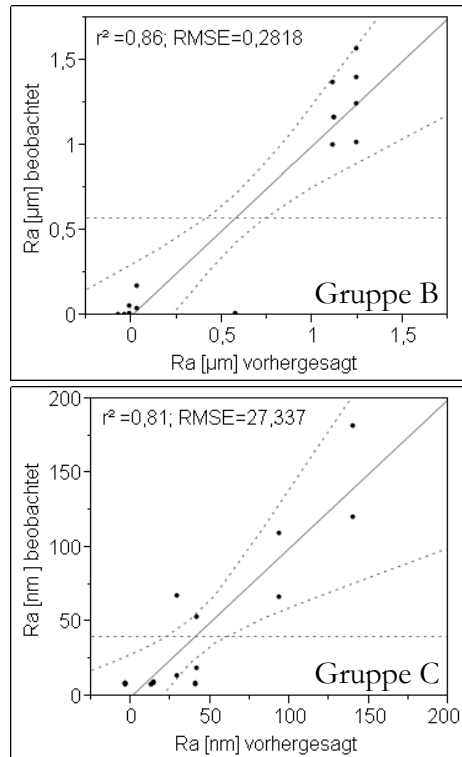


Abb. 5-19: Mess- über Vorhersagewerte Ra in Gruppe B und C

$$B = r^2 = \frac{Q_{Regression}}{Q_{Gesamt}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Gl. 5-2}$$

$\bar{y} \sim \text{Mittelwert der Zielgrößen}$

Im vorliegenden Fall werden für Gruppe B 86 % und für Gruppe C 81 % der gesamten Summe der quadratischen Abweichungen für die Zielgröße R_a durch das Regressionsmodell erklärt. Die Größe *RMSE* (root mean squared error) beschreibt die Abweichung des Schätzers vom zu schätzenden Wert (der Funktion). Grundlage der Berechnung von *RMSE* ist die Ermittlung der Summe der Fehlerquadrate zwischen den aus der Regressionsgleichung vorhergesagten Werten und den Referenzwerten, also der Quadratsumme der Residuen - *PRESS* (Predicted Residual Sum of Squares) oder Fehlerquadratsumme:

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \text{Gl. 5-3}$$

Aus *PRESS* berechnet man den mittleren Fehler *RMSE* entsprechend Gl. 5-4. [Kess07]

$$RMSE = \sqrt{\frac{PRESS}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad \text{Gl. 5-4}$$

Je kleiner der Wert für *RMSE*, desto besser passt die Vorhersage und damit das Modell zu den tatsächlichen Ergebnissen. Für die Gruppe C variiert die Rauheit zwischen $8 \text{ nm} \leq R_a \leq 182 \text{ nm}$ mit einem *RMSE* von 28 nm – also um das 6-fache kleiner als der Bereich von R_a – womit das Modell relativ gute Vorhersagekraft beweist.

Zur Überprüfung der Signifikanz aller Parameter auf die Zielgrößen bietet sich die Berechnung und grafische Darstellung des *t* – Wertes (Basis der Student-Verteilung) an. Diese Diagramme wurden bereits bei den Untersuchungen zum Schleifen erstellt.

Die *t-Werte* der sog. Parameterschätzer (Schätzwerte der Koeffizienten des linearen Modells) für die Zielgrößen ergeben sich nach Gl. 5-5 aus der Division der Schätzer (*Effekte*) durch den Standardfehler (*Std. Error*) der Parameterschätzer. Die *Effekte* werden nach Gl. 5-5 aus den Mittelwerten der mit den Faktorstufen multiplizierten Zielgrößenwerte berechnet.

$$Effekt = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\pm)y_i \quad \text{Gl. 5-5}$$

$$t - Wert = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\pm)y_i}{Std. Error} \quad \text{Gl. 5-6}$$

Der *Std. Error* basiert auf der partiellen Ableitung zweiter Ordnung der Parameter, welche durch Differenzenapproximation (Differenzenannäherung) berechnet wird. [Hill05] Schätzer, *Std. Error* und *t-Wert* werden von der Software JMP berechnet. In Verbindung mit der Aufstellung der zweiseitigen Vertrauensbereiche für 95, 99 und 99,9 % aus der Student-t-Verteilung ergeben sich die folgenden Diagramme (Abb. 5-20 und Abb. 5-21). Die darin dargestellten Signifikanzen erlauben es, den nachfolgenden Versuchsumfang zu minimieren, indem die Parameter, deren Einfluss auf die Zielgrößen vernachlässigbar ist, nicht mehr berücksichtigt werden.

Die Temperatur wird in diesen Tests als Zielgröße betrachtet, da mit einer (durch die Parameter) optimal eingestellten Poliertemperatur die Laserstrahlpolitur zur gewünschten Oberflächenqualität führt. Dass sie gleichzeitig eine Größe ist, die den Materialabtrag und die Rauheit beeinflusst (zudem noch gegenläufig), wird in späteren Ausführungen deutlich.

a) Signifikanztest Gruppe A

Stets einen hochsignifikanten Einfluss auf das Polierergebnis hat die Laserleistung. Hinsichtlich Rauheit und Temperatur stellt sie auch die einzige wichtige Einflussgröße dar. Sehr stark wirken sich Vorschub und die Kombination aus Leistung und Vorschub auf den Materialabtrag aus. Der Scangeschwindigkeit kann weder allein noch in Kombination mit anderen Parametern ein signifikanter Einfluss zugeschrieben werden. Lediglich beim Materialabtrag wird die einfache Signifikanzgrenze erreicht.

b) Signifikanztest Gruppe B

Die Tendenzen, die sich in Gruppe A bereits gezeigt haben, setzen sich in Gruppe B fort und zeigen sich z. T. noch deutlicher. Erneut hat die Laserleistung den größten Einfluss auf alle Zielgrößen. Beim Materialabtrag (der zu minimieren ist) ist dieser Einfluss abermals negativ zu bewerten, bei der Rauheit positiv. Die Scangeschwindigkeit hat auf den Materialabtrag noch weniger Einfluss als das in Gruppe A der Fall gewesen ist.

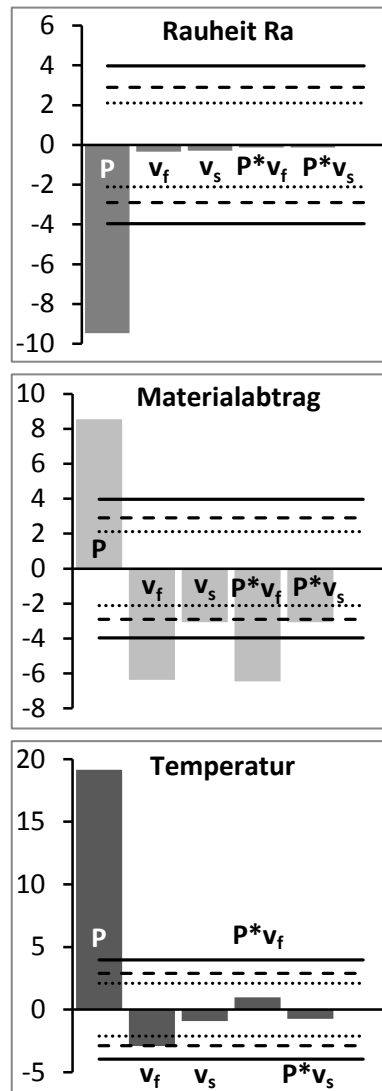
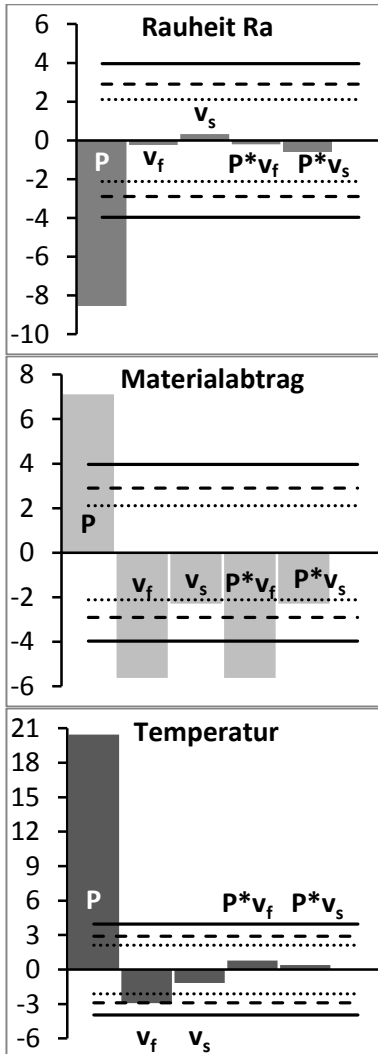


Abb. 5-20: Darstellung der Signifikanz der Prozessparameter auf Zielgrößen in Gruppe A

Gruppe B



Gruppe C

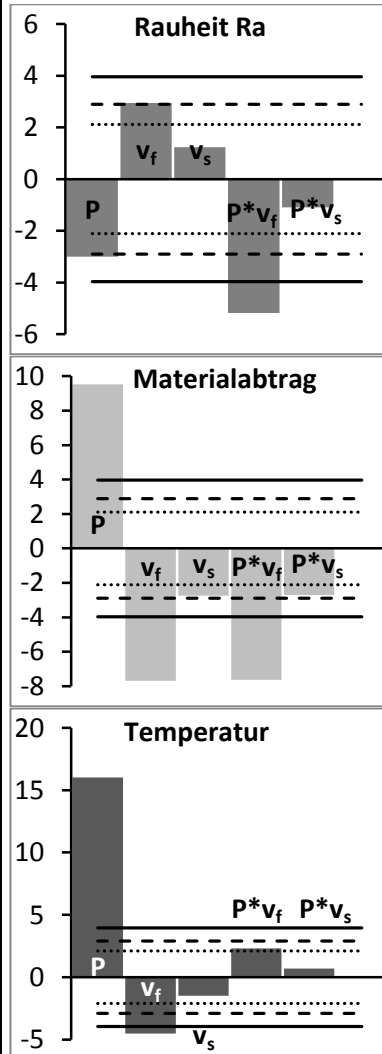


Abb. 5-21: Darstellung der Signifikanz der Prozessparameter auf Zielgrößen in Gruppe B und C

c) Signifikanztest Gruppe C

Die Ergebnisse für Gruppe C unterscheiden sich nur im nicht mehr hochsignifikanten Einfluss der Leistung auf die Rauheit. Das wird auch beim Rauheitswert R_q beobachtet, der sich (wie bereits auf S. 110 angenommen) analog zu R_a verhält. Die Vorschubgeschwindigkeit gewinnt dagegen einen hochsignifikanten Einfluss auf die Poliertemperatur.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die unterschiedlichen Ausgangsrauheiten der drei Gruppen die Signifikanz der Einflussgrößen (Prozessparameter) auf das Polierergebnis nicht maßgeblich verändern. Der Einfluss der einzelnen Parameter bleibt weitestgehend gleich. Es ist jedoch anzumerken, dass dies nur für die untersuchten Grenzen gilt, weil das Modell nicht darüber hinaus erweitert werden kann.

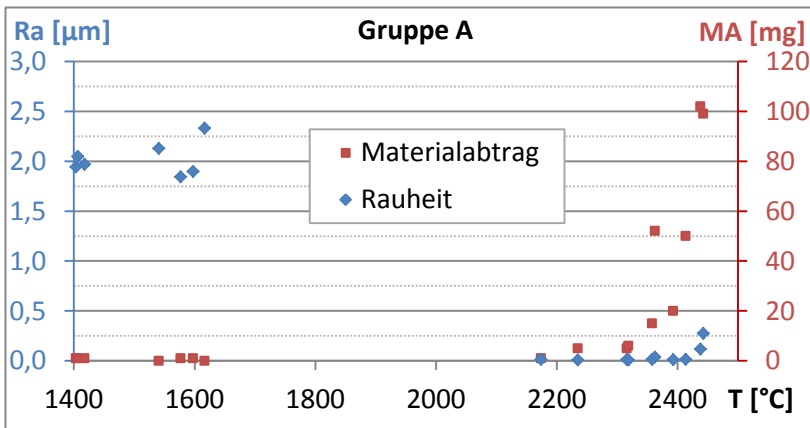


Abb. 5-22: R_a und MA in Abhängigkeit der von Temperatur für Gruppe A
 Beim Blick auf die Werte R_a und MA in Abhängigkeit von der Temperatur in Abb. 5-22 und Abb. 5-23 wird deutlich, dass bei den Gruppen A und B der mittlere Temperaturbereich (1900...2100 $^{\circ}\text{C}$) nicht erreicht wird. Die Wahl des untersuchten Leistungsbereiches von 10 % bis 25 % begründete sich auf Er-

gebissen aus Voruntersuchungen, in denen sich gezeigt hatte, dass innerhalb dieser Leistungsgrenzen poliert werden kann.

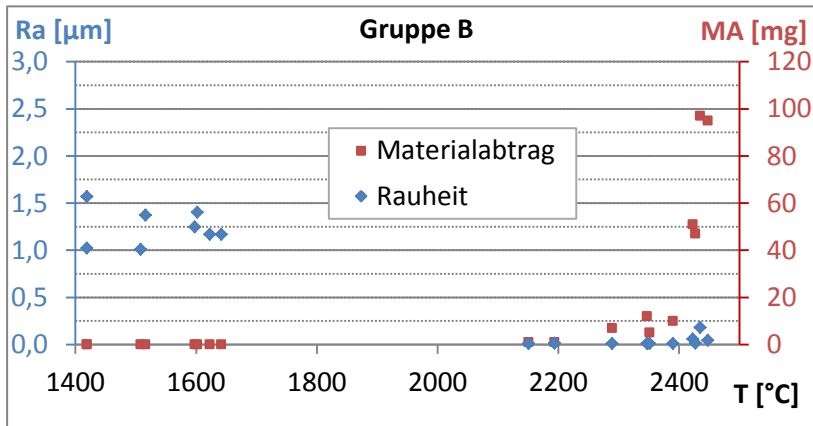


Abb. 5-23: Ra und MA in Abhängigkeit der von Temperatur für Gruppe B

Die Statistische Versuchsplanung verdeutlicht nun, dass die Parametergrenzen angepasst werden müssen. Eine höhere Temperatur kann über eine Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit oder eine Erhöhung der unteren Leistungsgrenze erfolgen. Hinsichtlich der Prozesseffektivität, ist die Vergrößerung der Laserleistung zu bevorzugen. So ergibt sich die untere Leistungsgrenze von 15 % für Gruppe C. Von einer Wiederholung der Versuchsreihen von Gruppe A und B (mit veränderten Parametern) wird dennoch abgesehen, da die Ergebnisse folgendes zeigen. Bei Temperaturen unterhalb von 1700 °C kann nicht von einer Politur gesprochen werden. Das zeigen auch die Rauheitswerte in diesem Bereich, welche sich nicht von der Ausgangsrauheit unterscheiden. Für die Gruppen A und B sind aber sehr hohe Temperaturen (> 2100 °C) nötig, um überhaupt ein Polierergebnis zu erreichen. Die Oberflächenrauheit kann in diesen Gruppen aber auch dann nur auf $R_a > 10$ nm reduziert werden und dabei tritt schon ein deutlicher Materialabtrag (> 10 mg) ein. Es ist nicht möglich, diese Oberflächen abtragfrei zu polieren. Das Profil ist

zu rau, der Unterschied zwischen Profilspitze und -tal zu groß. Ein Erweichen des Rauheitsprofils bis in die tiefsten Täler benötigt so viel Energie, dass die Profilspitzen bereits verdampft werden. Diese Rauheit bspw. auf einer 2½D-strukturierten Oberfläche zu glätten, würde zur Veränderung der Geometrie führen.

Die Verteilung der Messwerte ist in Probengruppe C (Abb. 5-24) schon deutlich gleichmäßiger. Hier kann bei allen Oberflächen von einer zumindest teilweise erfolgten LSP gesprochen werden. Für $2000\text{ °C} < T < 2200\text{ °C}$ werden Werte von $Ra < 10\text{ nm}$ bei vernachlässigbarem Materialabtrag ($< 1\text{ mg}$) erreicht.

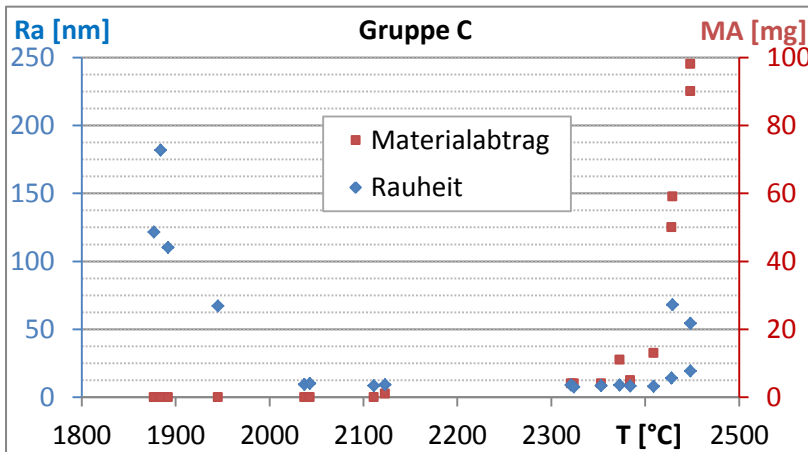


Abb. 5-24: Ra und MA in Abhängigkeit der Temperatur für Gruppe C

In den folgenden Untersuchungen werden nur noch Proben der Gruppe C verwendet. Das ist notwendig, um den Versuchsaufwand zu reduzieren. Weiterhin wird die Ausgangsrauheit der Gruppe C auch durch das favorisierte Schleifverfahren erreicht und eine anschließende LSP ist ohne die Gefahr des unkontrollierbaren Materialabtrages möglich. Damit kann auf Untersuchungen zu größeren Ausgangsrauheiten verzichtet werden.

5.4.4 Optimierung der Laserstrahlpolitur für Gruppe C

Im folgenden Versuchsplan wird der Vorschub verändert, um die Bearbeitungszeit zu verkürzen. Das beste Ergebnis in Versuchsplan 1 der Gruppe C ($R_q = 11 \text{ nm}$; $MA = 0 \text{ mg}$) wurde mit einem Vorschub von 5 mm/min erreicht, das ergibt eine Bearbeitungszeit von 48 s/cm^2 . Verglichen mit der Zeit von $3,8 \text{ min/cm}^2$, welche für die mechanische Politur in Abschnitt 3.5.3 benötigt wurde, ist das bereits eine deutliche Verbesserung. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass diese Zeit noch weiter verkürzt werden kann. Wenn allerdings der Vorschub vergrößert wird, muss gleichzeitig auch die Leistung erhöht werden, damit ein gleicher Energieeintrag pro Fläche erreicht wird. Im Weiteren wird ein anderer Bereich der Scangeschwindigkeit untersucht, denn bisher konnte für v_s kein signifikanter Einfluss auf das Polierergebnis nachgewiesen werden.

Die neuen Parametergrenzen sind:

$$30 \% \leq P \leq 40 \%$$

$$20 \text{ mm/min} \leq v_f \leq 40 \text{ mm/min}$$

$$600 \text{ mm/s} \leq v_s \leq 1000 \text{ mm/s}$$

Es handelt sich erneut um einen 2^3 -Plan mit Zentrumspunkt und einer Wiederholung, also um 18 Einzelversuche.

Wie Abb. 5-25 zeigt, passt das Modell für die neuen Parameter deutlich besser. Für die Rauheit R_q beträgt $r^2_{Rq} = 0,94$ ($r^2_{Ra} = 0,92$) und für die Temperatur $r^2_T = 0,97$. Der Korrelationskoeffizient r kann maximal 1 sein, dann lägen alle Punkte auf der Regressionsgeraden.

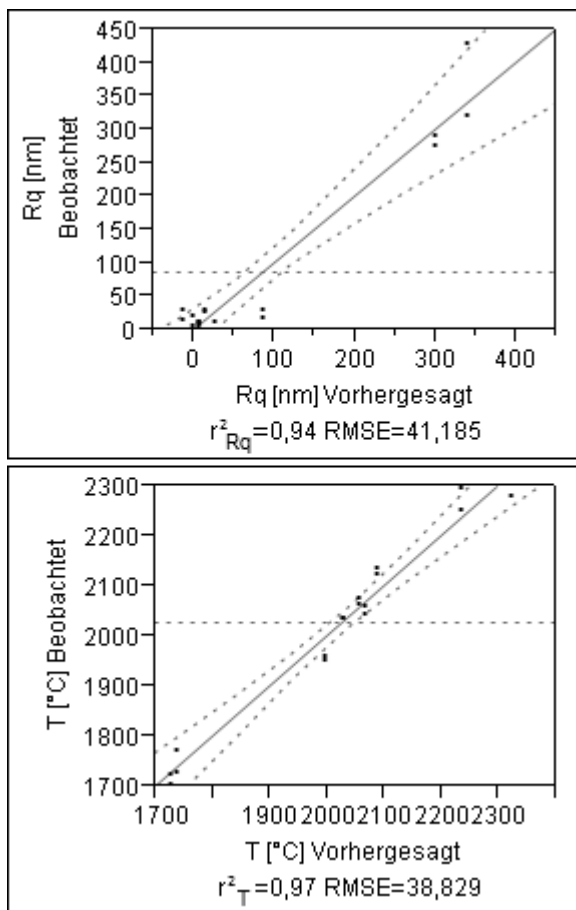


Abb. 5-25: Mess- über Vorhersagewerte R_q und T in Gruppe C (2)

Bei der Auswertung der Signifikanztests (Abb. 5-26) kann erneut der fehlende Einfluss von v_s beobachtet werden. Dagegen bleibt der starke Einfluss von P erhalten. Die Tendenz des zunehmenden Einflusses von v_f auf die Temperatur hat sich durch den nun hochsignifikanten Wert bestätigt.

Für zukünftige Versuche kann die Sangeschwindigkeit v_s konstant gehalten werden. Ihr Wert spielt dabei eine untergeordnete Rolle, solange er in den untersuchten Grenzen bleibt. Damit reduziert sich der Versuchsaufwand deutlich, da im Folgenden nur noch die Einflüsse der Laserleistung und der Vorschubgeschwindigkeit untersucht und für den Laserstrahlpolierprozess optimiert werden müssen. Auf die Darstellung der Signifikanzdiagramme für die Welligkeit wird verzichtet. Sie zeigen, dass in den untersuchten Grenzen und Gruppen kein Faktor einen hochsignifikanten Einfluss hat. Außerdem wird aus Abb. 5-27 und dem Wert für r^2_{Wq} mit 0,53 deutlich, dass das Modell die Welligkeit nicht beschreibt. Der Grund dafür ist die

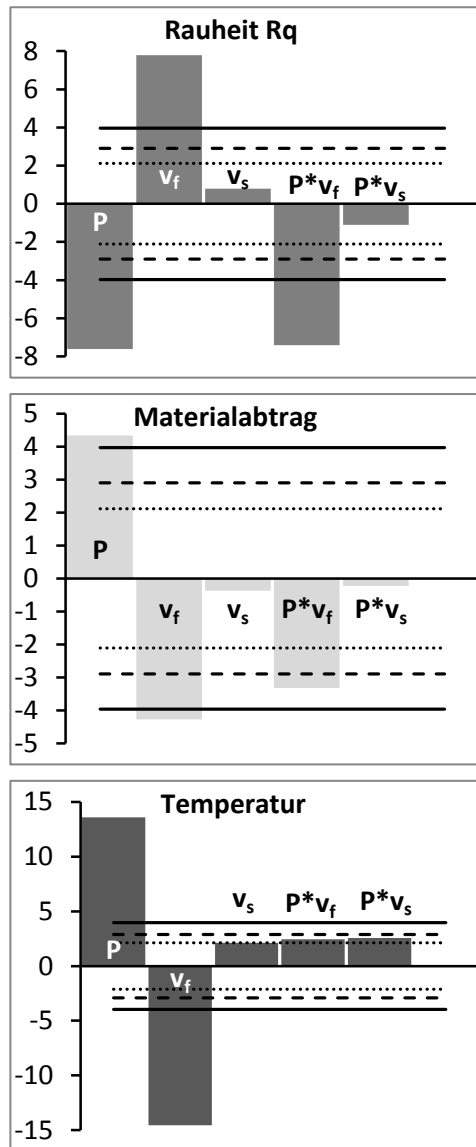


Abb. 5-26: Darstellung der Signifikanz der Prozessparameter auf Zielgrößen in Gruppe C (2)

unzureichende Trennung der Welligkeit von der Formabweichung. Die DIN EN ISO 3274 fasst bei der Filterung des Rohprofiles die Formabweichungen mit der Welligkeit zusammen. Zwischen beiden Größen erfolgt keine Trennung. So enthalten die Werte der Welligkeit immer auch Anteile des

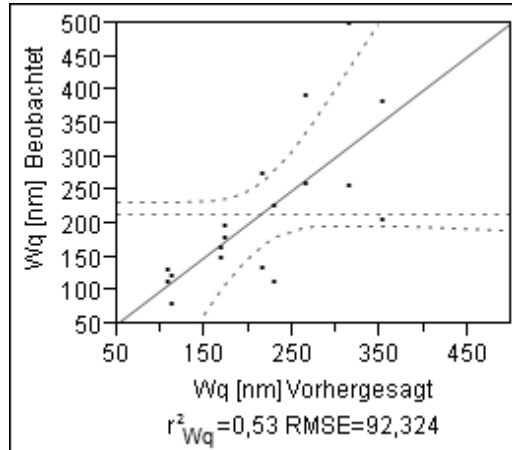


Abb. 5-27: Mess- über Vorhersagewerte W_q in Gruppe C (2)

Formfehlers. [CZiM08] Lediglich die Neigung des Rohprofiles wird herausgefiltert. Die in der DIN vorgeschriebenen und durch die Software des Tastschnittmessgerätes von Taylor Hobson verwendeten Gauß-Filter trennen die Rauheit von der Welligkeit nur auf Grundlage der Frequenz des Profilverlaufs. So wird die kurzwellige Rauheit von der langwelligen Welligkeit getrennt. [Volk05] Eine Trennung nach der Amplitude erfolgt nicht. Das führt dazu, dass die Ausgangswerte der Welligkeit (W_a , W_q) für Gruppe C z. T. im zweistelligen nm-Bereich und damit unterhalb der Werte für die Rauheit liegen, welche gezielt durch Läppen auf einer sehr ebenen Läppscheibe erzeugt wird. Das lässt sich durch den Wert W_t verdeutlichen, der bei einer sehr gut abgerichteten Läppscheibe auf ca. 250 nm reduziert werden kann. In der Gruppe C liegt er durchschnittlich bei 400 nm.

Ob die Welligkeit durch die LSP beeinflusst werden kann, wird (zusammen mit weiteren Ergebnissen) separat in Kapitel 6 diskutiert.

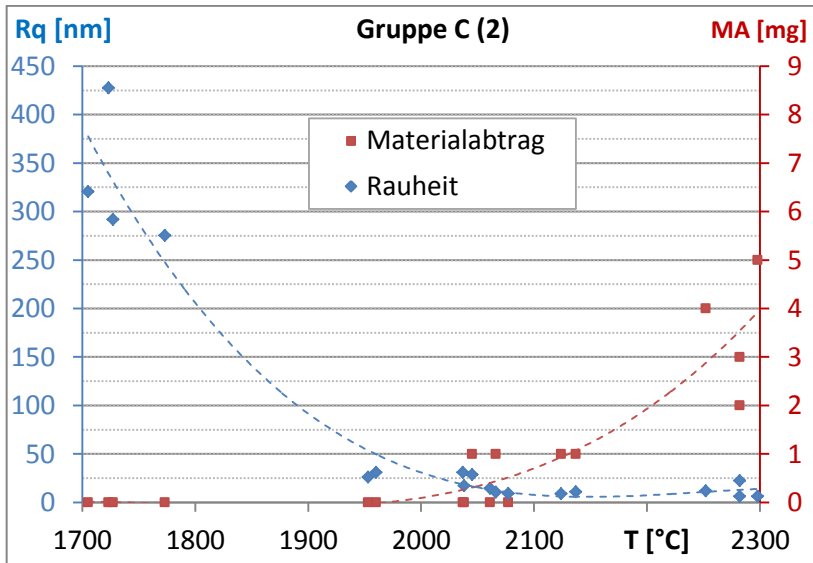


Abb. 5-28: Rq und MA in Abhängigkeit von der Temperatur für Gruppe C (2)

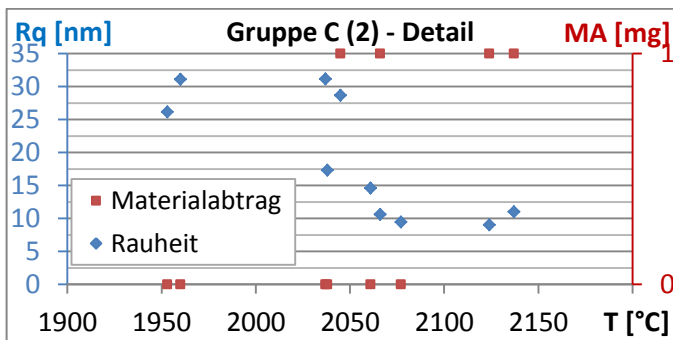


Abb. 5-29: Rq und MA in Abhängigkeit von der Temperatur für Gruppe C (2) - Detail

Die Rauheit (R_q)⁹ und der Materialabtrag – die wichtigsten Zielgrößen dieser Untersuchungen – sind im Diagramm in Abb. 5-28

⁹ Darstellung $R_q \rightarrow$ Nachweis der Annahme, dass sich Rauheits-Kenngrößen analog verhalten (vgl. S. 69)

in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Es zeigt einen mathematischen Zusammenhang¹⁰ zwischen den Zielgrößen Rauheit und Materialabtrag und der Zielgröße Temperatur. Es wird nun auch sehr deutlich, welcher Temperaturbereich erreicht werden muss, um von einer LSP der Probenoberfläche sprechen zu können. In Abb. 5-29 wurde der Temperaturbereich von 1900 bis 2200 °C aus Abb. 5-28 vergrößert. Der Materialabtrag beträgt maximal 1 mg und die Rauheit bewegt sich zwischen $31 \text{ nm} \geq R_q \geq 9 \text{ nm}$, wobei Temperaturen zwischen 1950 und 2150 °C vorliegen.

5.4.5 Nomogramme – kombinierter Einfluss von Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit

Für diese Untersuchung werden Proben aus Gruppe C verwendet. Die Scangeschwindigkeit wird auf 800 mm/s festgesetzt. In den Diagrammen in Abb. 5-30 sind die wichtigen Zielgrößen Rauheit (R_a) und Materialabtrag sowie die dafür notwendige Temperatur in Abhängigkeit von der Laserleistung bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten dargestellt. Diese Nomogramme erlauben es, verschiedene Parameterkombinationen für bestimmte Zielgrößenbereiche abzulesen. Betrachtet man die Temperatur von 2150 °C, dann kann sie durch drei verschiedene Leistungsstufen (620, 670, 710 W) bei entsprechend angepasstem Vorschub (40, 45, 50 mm/min) erreicht werden und führt zum gleichen Materialabtragminimum von 1 mg und zur Rauheit R_a von 6 bzw. 7 nm. Die gleichen guten Ergebnisse ($R_a = 7 \text{ nm}$; $MA = 1 \text{ mg}$) können auch schon bei 1950 °C durch geringere Leistung und den angepasst niedrigsten Vorschub (40 mm/min) erreicht werden. Der Vorteil des niedrigeren Vorschubs liegt in der besseren Durchwärmung der Probe, welche wiederum zu geringeren Materialspannungen führt. Das beste Ergebnis dieses

¹⁰ Die eingezeichneten Trendlinien sind Polynome 3. Grades.

Versuchs wird mit $MA \approx 0$ mg und $Ra = 6$ nm bei 2100°C durch die Leistung von 670 W und den maximalen Vorschub von 50 mm/min erreicht. Die Bearbeitungszeit beträgt in diesem Fall $4,8$ s/cm² und damit nur ein Fünftel der Zeit, welche für die mechanische Politur benötigt wird (vgl. Abschnitt 3.5.3)

In dieser Versuchsreihe und in allen folgenden Untersuchungen wird der Vorschub während der LSP über die Probe hinweg variiert. Der Gesamtvorschub setzt sich also aus den Vorschüben der Einzelabschnitte zusammen. Zweck dieser Variation ist die Schaffung einer homogenen Temperaturverteilung über die gesamte Probe (vgl. 5.4.1 und 6.5.3).

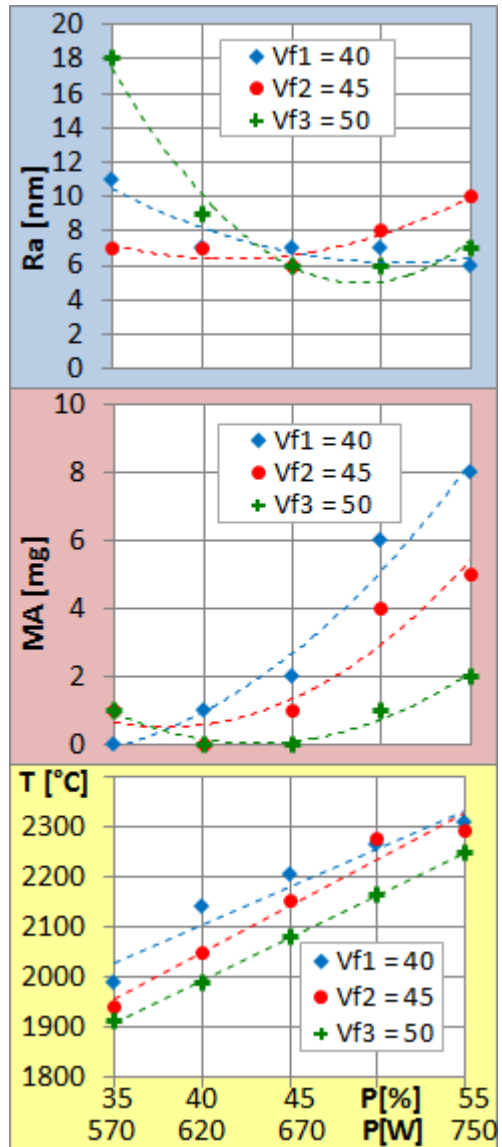


Abb. 5-30: Ra , MA und T in Abhängigkeit der Leistung bei variierendem Vorschub

6 Weitere Untersuchungen polierter Proben und Diskussion der Ergebnisse

6.1 Begründung für weitere Messungen an den Oberflächen

Die vorgestellten Ergebnisse der LSP dienen vorrangig der Prozessoptimierung auf Basis der Statistischen Versuchsplanung. Sie beschränkten sich auf die beiden wichtigsten Zielgrößen Rauheit und Materialabtrag. In der anschließenden Diskussion spielen diese weiter eine wichtige Rolle, werden aber z. T. durch andere Verfahren bestimmt und bewertet sowie durch weitere Kennwerte ergänzt.

Die Bestimmung der Qualität einer laserpolierten Oberfläche mit Rauheiten < 10 nm allein an einem Tastschnittmessgerät ist kritisch, da bereits die Auflösungsgrenze dieses Verfahrens erreicht wird. Es bietet in seiner Standardkonfiguration auch keine Aussage über die flächige Verteilung der Qualität. Betrachtet man die laserpolierten Proben, so zeigen einige trotz spiegelnder Oberflächen mit vollständiger Transparenz eine Struktur. Diese ist nicht periodisch, sondern zufällig, und nur schwer darstellbar. Auswertungen dieser Oberflächen am AFM, am REM, am Messmikroskop, unter Einsatz der differentiellen Interferenzmikroskopie (DIK) und am 3D-Tastschnittmessgerät bilden einen wichtigen Teil der Diskussion. Bisherige Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die Qualität der Politur auch durch Fremdstoffe auf den Proben beeinflusst wird. Es wird folglich untersucht, in wie weit ein nachweisbarer Zusammenhang besteht.

Anhand der bislang dokumentierten Ergebnisse wird deutlich, dass die auf der Probenoberfläche erreichte Temperatur der entscheidende Faktor der LSP ist. Die Laserparameter beeinflussen das Polierergebnis also indirekt über die Temperatur, die sie erzeugen. Deshalb kommt dem Temperatureinfluss und der vergleichenden Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera ein Kapitel der Diskussion zu.

Die Temperaturgradienten sind für Spannungen verantwortlich. Diese wurden in 3.6.2 simuliert und können, wie in 3.6.3 dargestellt, durch einen Kühlprozess beseitigt werden. Gezielte Untersuchungen zeigen, inwieweit diese Spannungen nach der LSP vorhanden sind und wie sie durch die Wahl der Prozessbedingungen und –parameter beeinflusst werden können.

Den Abschluss des Kapitels bildet die Entwicklung eines Modells für die LSP, in welches die Ergebnisse der Untersuchungen einfließen und das die Grundlage für den industriellen Einsatz der LSP darstellt.

6.2 Zusammenhang zwischen polierfähigen Oberflächen und Ergebnissen der LSP

Eine allgemeingültige Definition für eine laser-polierfähige Oberfläche gibt es nicht. Durch den Einsatz des Laserstrahles kann auf jeder rauen Quarzglasoberfläche Transparenz durch Glättung erzeugt werden. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass durch die LSP keine Formfehler beseitigt werden können. Eine klare Aussage kann über die Beeinflussung der Oberflächenrauheit (wie sie in 5.4.4 auf S.119 diskutiert wird) getroffen werden. Um Rauheiten von R_a im einstelligen nm-Bereich ohne nachweisbaren Materialabtrag zu erreichen, sollte die Quarzglasoberfläche so bearbeitet sein, dass eine Ausgangsrauheit von $R_a \leq 0,4 \mu\text{m}$ vorliegt. Das ist mit allen mechanischen Abtragverfahren, welche in Abschnitt 5.2 und 5.3 untersucht wurden, möglich. Liegt die Rauheit höher, kann ebenfalls ein minimaler R_a -Wert bis 10 nm erreicht werden. Dafür sind allerdings wesentlich höhere Temperaturen ($> 2100^\circ\text{C}$) notwendig und somit muss mit einem Materialabtrag von bis zu 0,3 % gerechnet werden. Des Weiteren zeigen so polierte Proben stark abgerundete Kanten. Bei der Anwendung auf 2½D- und 3D-Mikrostrukturen kann dies bereits die Zerstörung der Funktion bedeuten.

Tabelle 6-1: Übersicht – Reduzierung der Rauheit in Abhängigkeit v. Temperatur u. Materialabtrag

Gr.	Ra vor LSP[μm]	T [°C]	Ra nach LSP [nm]	Materialabtrag [mg]
A	2,129	2290	10	5
B	1,186	2344	11	9
C	0,319	2082	8	0,5
gemittelte Werte				

In der Tabelle 6-1 sind die Mittelwerte ausgewählter Proben aus den einzelnen Rauheitsgruppen einander gegenüber gestellt. Es handelt sich jeweils um die Proben der Gruppe mit einem Ra-Wert nach der LSP von 11 nm und besser. Gleichzeitig wurde auf den niedrigsten Materialabtrag innerhalb der Gruppe geachtet. Aus dieser Gegenüberstellung werden sofort die oben beschriebenen Zusammenhänge deutlich. Mit höherer Temperatur (größerem Energieeintrag) kann die Rauheit stärker (bis zu einem Minimum) reduziert werden, wobei der Materialabtrag ansteigt. Für alle weiteren Proben innerhalb der Gruppen gilt, dass bei Temperaturen oberhalb der in der Tabelle dargestellten die Rauheit zusammen mit dem Materialabtrag ansteigt. (Vgl. auch Abb. 5-22 S.116; Abb. 5-24 S.118)

6.3 Zusätzliche Charakterisierung und Bewertung der Oberflächen nach der LSP

6.3.1 Darstellung des Oberflächenprofils

Für Abb. 6-1 wurde eine Probe aus der Gruppe A (A223)¹¹ so fotografiert, dass die beschriebene zufällige Struktur, die sich durch den Begriff „Orangenhaut“ beschreiben lässt, deutlich hervortritt. Der Rq-Wert dieser Probe liegt in der Probenmitte (Messlänge

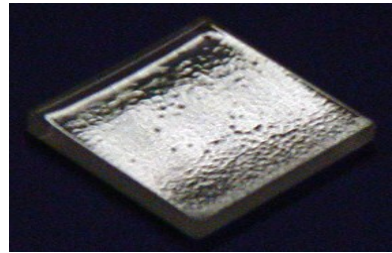


Abb. 6-1: Struktur „Orangenhaut“

15 mm) bei 12 nm, einer Rauheit, die mit bloßem Auge nicht aufgelöst werden kann und nur durch den streifenden Lichteinfall sichtbar wird. Es ist folglich schwierig, ein geeignetes Verfahren zur quantitativen Beurteilung und guten grafischen Darstellung dieser Struktur zu finden. 2D-Tastschnittmessungen ergeben in kurzer Zeit einen zweidimensionalen Profilschnitt, der keine Aussage über die dreidimensionale/flächige Gestalt der Oberfläche gestattet. Deshalb werden die folgenden Verfahren angewendet:

a) 3D-Tastschnittmessung

Bei dem Verfahren entsteht die 3D-Oberflächendarstellung aus zusammengesetzten Einzeltastschnitten. Eine zusätzliche Linearrachse (Y-Achse) bewegt die Probe nach jedem Schnitt um mindestens 50 µm senkrecht zur Messrichtung weiter. Das ist zeitaufwendig (ca. 30 min/mm), wenn der Aufnahmebereich in Y-Richtung groß ist. Die Zeit verdoppelt sich zusätzlich, wenn die Messgeschwindigkeit in X-Richtung zur genaueren Messwertfassung halbiert wird. Abb. 6-2 zeigt einen ca. 4 x 1 mm² gro-

¹¹ Alle Proben haben nach der spanenden Vorbearbeitung eine fortlaufende Nummer erhalten (Lasergravur), die auch den Buchstaben der Gruppe enthält.

ßen (nach Welligkeit gefilterten) Ausschnitt aus der Oberfläche einer laserpolierten B-Probe (B212). Es handelt sich um die beste Oberfläche dieser Gruppe mit einem Ra-Wert von 10 nm. Man erkennt deutlich die Struktur aus Abb. 6-1. Der Wert der Welligkeit (Wa) ändert sich durch die LSP nicht, er betrug 320 nm vor und 360 nm nach der Politur.

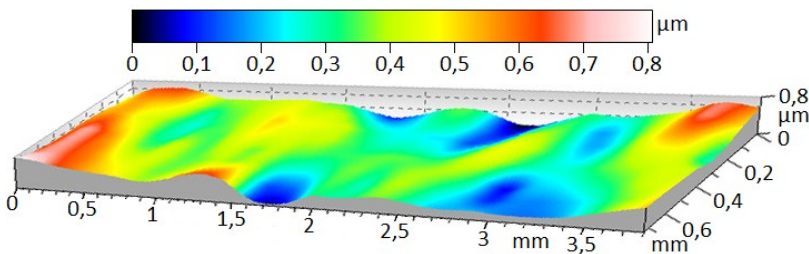


Abb. 6-2: Oberflächendarstellung (Welligkeit) aus 3D-Tastschnittmessung

b) Differentieller Interferenzkontrast

Die Möglichkeit der visuellen Wahrnehmung der „Orangenhaut“ impliziert die lichtmikroskopische Untersuchung der laserpolierten Oberflächen. Jedoch lässt sich unter einem herkömmlichen Mikroskop weder mit Auf- noch mit Durchlicht ein Effekt feststellen. Erst der Einsatz der DIK-Mikroskopie ermöglicht ihre bildliche Darstellung. Durch den Differentiellen-Interferenz-Kontrast in der Auflichtmikroskopie können Höhenunterschiede innerhalb des Schärfentiefebereichs sichtbar gemacht werden. Dafür wird polarisiertes Weißlicht durch ein Wollaston-Prisma in 2 Strahlen (mit senkrecht zueinander stehenden Schwingungsebenen) aufgeteilt, durch einen Kondensor parallelisiert und fällt phasenverschoben auf das zu untersuchende Objekt. Die von der Oberfläche reflektierten Strahlen werden durch dasselbe Prisma vereinigt, passieren einen Polarisator und interferieren. [Mitu08] Das Bild entsteht durch die auftretenden Gangunterschiede. Das nun sichtbare Relief basiert auf dem Unterschied in der optischen Weglänge des Lichts, hervorgerufen durch die unterschiedliche

Profilhöhe auf der Probe. Die Graustufung zwischen Schwarz und Weiß im Bild wird durch die Größe der Höhenunterschiede, aber auch durch die Position des Prismas im Strahlengang bestimmt. Diese ist so gewählt, dass der größtmögliche Kontrast entsteht. Eine Abschätzung über die Schwankung in der Höhe des Oberflächenprofils (also der Rauheit) kann durch die Berechnung der visuell empfundenen Schärfentiefe T_{VIS} nach BEREK [Leic08] realisiert werden.

$$T_{VIS} = n \cdot \left[\frac{\lambda}{(2 \cdot NA^2)} + \frac{340 \mu m}{(NA \cdot M_{tv})} \right] \quad \text{Gl. 6-1}$$

n - Brechzahl des umgebenden Mediums ($n_{Luft} = 1$)

λ - mittlere Wellenlänge der genutzten Lichtquelle ($\lambda = 0,55 \mu m$)

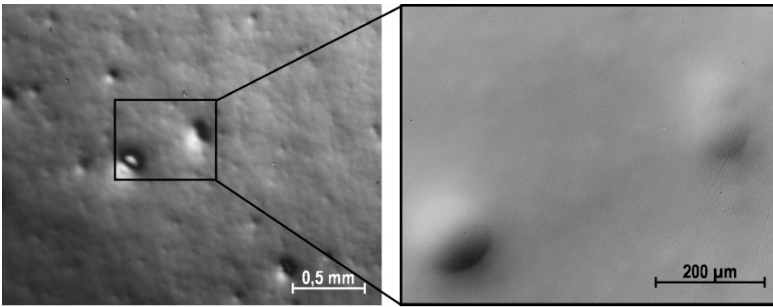
NA - objektseitige Num. Apertur ($NA_{3,2} = 0,06$; $NA_{6,3} = 0,12$;

$NA_{12,5} = 0,25$)

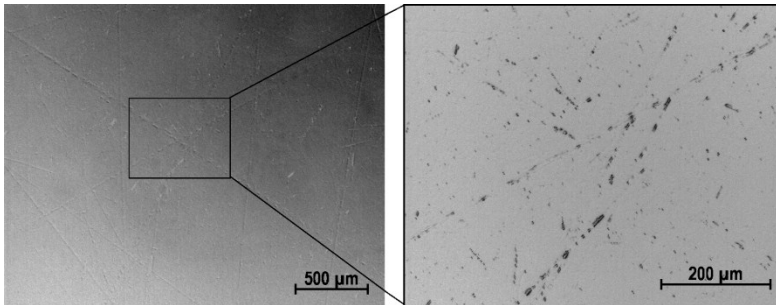
M_{tv} - Gesamtvergrößerung des Mikroskops

($M_{tv1} = 32$; $M_{tv2} = 50$; $M_{tv3} = 125$)

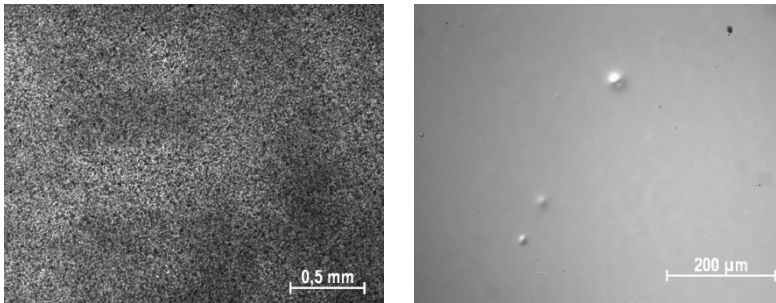
Mit den oben genannten Werten, eingesetzt in Gl. 6-1, ergibt sich T_{VIS} für die 32-fache Vergrößerung zu $253 \mu m$, für die 50-fache zu $76 \mu m$ und für die 125-fache zu $15 \mu m$. Für die Untersuchungen der geschliffenen/geläppten und laserstrahlpolierten Oberflächen bedeutet das, dass ihre Struktur vollständig im Bereich der Schärfentiefe liegt. Die Beispiele in Abb. 6-3 zeigen ausgewählte DIK-Aufnahmen. Eine geläppte Oberfläche (C234) stellt sich als schwarz/weißes „Bildrauschen“ dar, da die Spitzen und Täler des Rauheitsprofils ($Ra = 275 \text{ nm}$) abgebildet werden. Gleichzeitig ist die übergeordnete Welligkeit zu erkennen. Die am Tastschnittmessgerät ermittelten Welligkeitsprofile zeigen Abstände zwischen benachbarten Wellentälern von rund 1 mm . Dieselbe Probe zeigt nach der LSP eine nahezu einförmig graue Oberfläche, was bedeutet, dass die Höhenunterschiede im Profil sehr gering ausfallen und allmählich verlaufen. Der Ra -Wert dieser Probe beträgt 6 nm .



C234 laserpoliert (x32 und x125)



mechan. polierte Probe (x32 und x125)



C234 geläppt (x50)

mechan./laserpol. Probe (x125)

Abb. 6-3: Beispiele von DIK-Aufnahmen unterschiedlich bearbeiteter Quarzglasoberflächen

Es treten bei dieser Probe deutliche (zumeist kreisrunde) Vertiefungen auf. Dieser Effekt wird – mehr oder weniger stark – bei allen laserstrahlpolierten Proben beobachtet. Die mechanisch

polierte Quarzglasoberfläche ist in der DIK-Aufnahme eine einheitlich graue Fläche mit einem kontinuierlichen Hell-Dunkel-Verlauf von links unten nach rechts oben, der durch eine leichte Schräglage der Probe hervorgerufen wird. Weiterhin sind – vor allem in der 125-fachen Vergrößerung – feinste Kratzer zu erkennen, die durch die mechanische Politur nicht vollständig beseitigt wurden. Die „Orangenhaut“ tritt nicht auf, ist also keine Eigenheit des Quarzglases. Um nachzuweisen, dass sie kein Resultat der LSP an sich, sondern eine prozessbedingte Erscheinung aus der Erweichung der vormals vergleichsweise rauen Oberfläche – also gleichermaßen ein nicht vollständig eingeebnetter Rest dieses Profils ist, wurde die mechanisch polierte Probe anschließend laserpoliert. Die DIK-Aufnahme dieser Oberfläche zeigt nun weder Kratzer noch „Orangenhaut“. Nur die runden Vertiefungen, die bereits in der 125-fachen Vergrößerung der laserpolierten Probe C234 zu erkennen waren, sind nur vereinzelt noch zu finden. Ihre Ursache sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Verunreinigungen, die sich zum Zeitpunkt der LSP auf der Oberfläche befunden haben.

Wie stark die LSP von der Poliertemperatur abhängt, zeigt Abb. 6-4. Der im DIK-Mikroskop betrachteten Oberfläche der Probe A223 (aus Abb. 6-1) wird die Temperatur am Polierort zugeordnet. Die ersten 3 mm der Oberflächenstruktur der Probe nach der Vorbearbeitung, innerhalb derer die pyrometrisch gemessene Temperatur von Raumtemperatur auf 1600 °C ansteigt, werden kaum beeinflusst. Das mittlere Bild ist in der Probenmitte aufgenommen, einem Bereich, in welchem eine Poliertemperatur von ca. 1950 °C erreicht und relativ konstant gehalten wird. Das Rauheitsprofil ist verschwunden, jedoch bleibt eine stärker ausgeprägte Welligkeit (vgl. C234 aus Abb. 6-3) zurück, da diese durch den größeren Läppprozess entstanden und durch die LSP nicht zu beseitigen ist. Das dritte Bild vom Probenende zeigt die starke Verrundung der Kante und die stark eingeebnete Fläche auf den

letzten 1,5 mm. Die Temperatur steigt in diesem Bereich auf 2240 °C an. Es findet Materialabtrag und ein deutliches Fließen des Glases statt. Der so entstandene Oberflächenbereich ist zwar mit der Oberfläche einer mechanisch polierten Probe vergleichbar, jedoch wird die Form (z. B. der Kante) zerstört. Für die Anwendung der LSP auf mikrostrukturierten Oberflächen ist dies nicht zielführend.

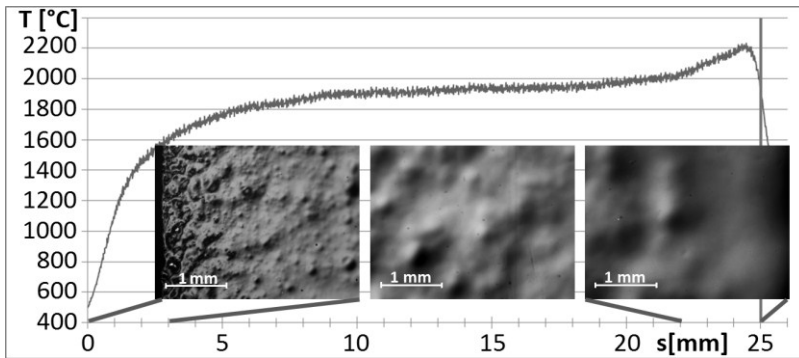


Abb. 6-4: Oberfläche im DIK (x50) in Abhängigkeit der Temperatur

c) Rasterkraftmikroskopie (AFM)

Die DIK-Mikroskopie ermöglicht eine sehr schnelle Bilderfassung, aber nur eine qualitative Aussage über das Erscheinungsbild der Oberfläche. Laterale Ausdehnungen einzelner Strukturen können messtechnisch erfasst werden, wobei es sich nur um exemplarische Ergebnisse handelt, welche manuell für jede einzelne Struktur in der Software ermittelt werden müssen. Dies wiederum erfordert einen hohen Zeitaufwand. Quantitative Aussagen über die Qualität der Oberfläche (Rauheit, Welligkeit) sind ebenfalls nicht möglich. Soll die gesamte Struktur vermessen werden, dann ist das Tastschnittverfahren geeigneter. Es errechnet diese Werte aus Linienprofilen, hat aber im Bereich einstelliger nm-Werte seine Grenzen erreicht. Deshalb werden ausgewählte Proben mittels AFM (Atomic-Force-Microscope)

untersucht. Abb. 6-5 zeigt, dass die Oberfläche damit 2- und 3-dimensional erfasst und quantitativ bewertet werden kann.

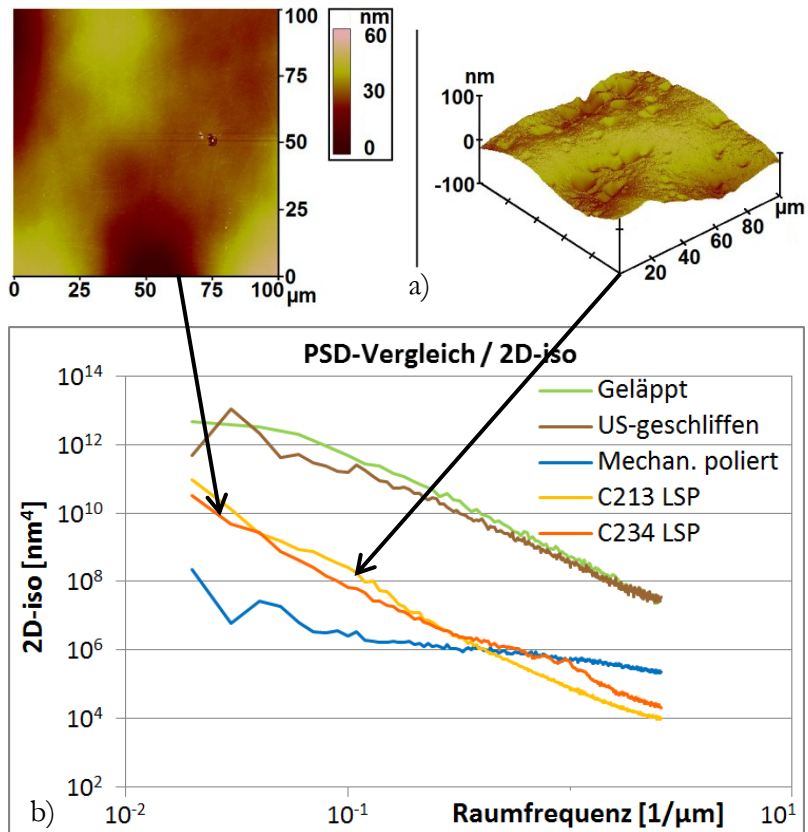


Abb. 6-5: a) 2 und 3D-AFM-Bilder von laserpolierten C-Proben;
b) Vergleich der PSD-Funktionen

Die beiden laserpolierten Proben der Gruppe C zeigen sowohl im 2D- als auch im 3D-Bild die wellige Struktur der „Orangenhaut“, und es wird bestätigt, dass diese sich im nm-Bereich bewegt. Auf Probe C213 wurde ein Oberflächenabschnitt ausgewählt, der die bereits beschriebenen runden Vertiefungen aufweist. Der Vergleich der PSD-Funktionen in Abb. 6-5 b) zeigt verschieden bearbeitete Quarzglasproben. Die Leistungs-

dichtefunktion (engl. **p**ower **s**pectral **d**ensity function) erlaubt eine Bewertung von Präzisionsoberflächen. Die Funktion ermittelt die Amplitude zu einem Rauheitswert des Rauheitsprofils der Oberfläche als Funktion der Wellenlänge. [Blie08] Das Diagramm zeigt zum einen, dass das ultraschallunterstützte Schleifen die gleiche Oberflächenqualität ermöglicht wie das Läppen. Zum anderen wird deutlich, dass die Qualität der laserstrahlpolierten Oberflächen bei kürzeren Wellenlängen (also unter Vernachlässigung der Welligkeit) noch besser ist, als die Qualität der mechanisch polierten. Der Oberflächenmessbereich beträgt maximal $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ und überstreicht damit nur einen Bruchteil der Auswertelänge des Tastschnittmessgerätes (15 mm). In Folge dessen sind die Rauheitswerte geringfügig besser, wie Tabelle 6-2 bestätigt. Es zeigt sich weiterhin, dass, in Abweichung von bisherigen Aussagen, das Tastschnittverfahren auch im 1-stelligen nm-Bereich noch verlässliche Werte liefert und somit gut für die schnelle Auswertung der Oberfläche geeignet ist.

Tabelle 6-2: In AFM-Untersuchung ermittelte Oberflächenkenngrößen

Probe / Bearbeitung	Ra _{AFM} [nm]	Rq _{AFM} [nm]
geläppte Oberfläche	335	409
ultraschallunterstützt geschliffene Oberfläche	180	188
mechanisch polierte Oberfläche	2	3
C213 / laserstrahlpolierte Oberfläche	10 (12)*	13 (15)*
C234 / laserstrahlpolierte Oberfläche	6 (8)*	8 (11)*
(*)* Werte aus Tastschnittmessung		

d) Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Die REM ermöglicht die Darstellung von Strukturen im Millimeter- bis Nanometerbereich mit einer hohen Schärfentiefe. Um das nichtleitende Material Quarzglas zu untersuchen, müssen die Proben mit einer Gold- bzw. Kohlenstoffschicht bedampft werden. Die Kohlenstoffschicht ist zwingende Voraussetzung für die EDX, die energiedispersive Röntgenspektroskopie, die Goldschicht eignet sich besonders für eine kontrastreiche Darstellung der Oberflächenstruktur. Mit Verlängerung der Bedampfungszeit nimmt die Schichtdicke von 10 auf 50 nm zu.

Die Proben in den Bildern I bis III in Abb. 6-6 sind mit einer Goldschicht (ca. 50 nm) bedampft. Die Struktur, die durch das Lappen entsteht, ist auf diese Weise gut abbildbar (Bild I), ebenso einzelne Ausbrüche und Kratzer auf der mechanisch polierten Oberfläche in Bild II. Die Struktur auf der laserpolierten Oberfläche kann aber in keiner Vergrößerung sichtbar gemacht werden. Auch ein Kippen der Probe führt nicht zum Erfolg. In Bild III sind 2 runde Erscheinungen zu sehen, die evtl. zuvor schon im DIK-Mikroskop und AFM zu beobachten waren. Erst

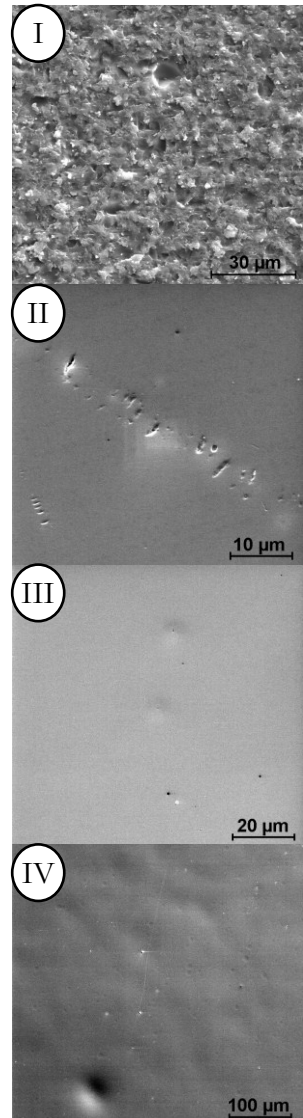


Abb. 6-6: REM-Aufnahmen verschieden bearbeiteter Quarzglasoberflächen

ein erneutes Reinigen und Bedampfen mit einer deutlich dünneren Goldschicht (ca. 10 nm) ermöglichte auch im REM die Darstellung der „Orangenhautstruktur“ (Bild IV). So kann auch an dieser Stelle die bisher getroffene Abschätzung der Höhe der Struktur auf einen 2-stelligen nm-Bereich bestätigt werden, denn ist die Goldschicht dicker, wird die Struktur nachweislich nicht erfasst.

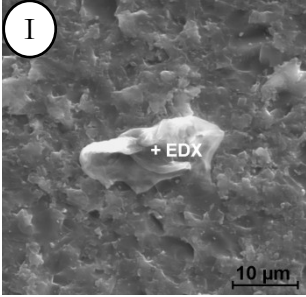
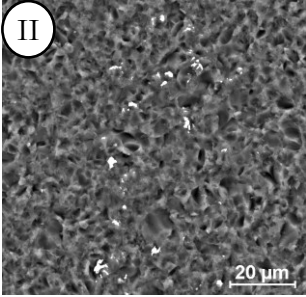
Andere Aufnahmen des REM in höheren Vergrößerungen zeigen unterschiedliche Defekte auf den polierten Oberflächen. Zum Teil handelt es sich dabei um Materialabplatzungen, die auf Grund ihrer geringen Größe und ihrer scharfen Kanten weder durch die LSP noch durch mechanische Beeinflussung entstehen können. Ihre Ursache wird ebenfalls in Verunreinigungen auf den zu polierenden Oberflächen vermutet. Dazu finden im folgenden Abschnitt weitere Betrachtungen statt.

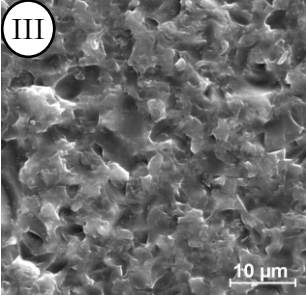
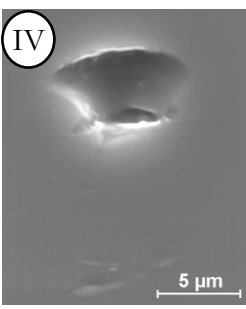
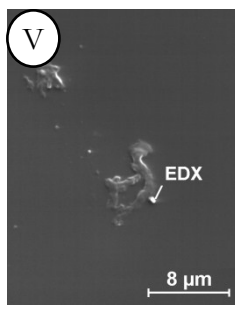
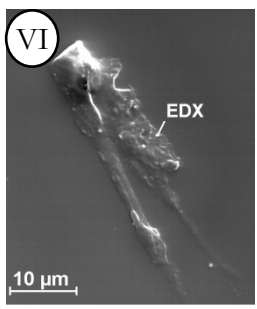
6.3.2 Beeinflussung der Oberflächenqualität durch Fremdstoffe

Eine geläppte Oberfläche bietet auf Grund ihrer rauen Struktur (vgl. Abb. 6-6) ideale Bedingungen für die Einlagerung von Fremdmaterial. Es wird beobachtet, dass ungereinigte Proben – wie sie z. B. zum Einrichten der Versuchsanordnung verwendet werden – schlechtere Poliererergebnisse als gereinigte und sorgfältig gelagerte aufweisen. Es ist daher wichtig, diesen bereits bekannten Einfluss durch Verunreinigung näher zu untersuchen. Dabei geht es nicht nur um die Handhabung und Lagerung der Proben, sondern auch darum, wie schon durch die Vorbearbeitung Verunreinigungen entstehen, welche das sind und mit welchem Aufwand sie entfernt werden müssen. Dafür werden 3 Proben beidseitig und auf derselben Scheibe, mit demselben Läppmittel vorbearbeitet. Anschließend werden sie unterschiedlich aufwendig gereinigt und einseitig laserpoliert. Die Untersuchung dieser so hergestellten Proben erfolgt im REM in 2 Schritten. Zunächst werden die geläppten Seiten betrachtet, anschließend, nach erneutem Reinigen und Bedampfen der Proben,

die laserpolierten. In Tabelle 6-3 findet sich eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Untersuchung. Es zeigt sich z. B., dass Proben, von welchen das Läppmittel nur abgespült wird, stark verunreinigt sind. Zum Nachweis der Ursache der Verunreinigungen wurden vergleichende EDX-Analysen der Lappscheibe sowie des Verpackungs- und Reinigungsmaterials durchgeführt.

Tabelle 6-3: Einfluss verschiedener Reinigungszustände auf die Oberflächenqualität

Probe / Reinigung	C I / Läppmittel durch Abspülen mit Wasser entfernt
<p data-bbox="206 609 474 641">Ergebnis vor der LSP</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • BSE-Aufnahmen zeigen viel und unterschiedliches Fremdmaterial in den Poren der Oberfläche. • EDX (an Pos. in Bild I) ergibt Kohlenstoff-Sauerstoff-Verbindung, durchsetzt mit Na, S, Cl, K, Ca → es handelt sich um Putz/Verpackungsmaterial oder um Hautpartikel.
Probe / Reinigung	C II / wie C I und Reinigung im Ultraschall-Wasserbad
<p data-bbox="206 999 474 1031">Ergebnis vor der LSP</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • BSE-Aufnahmen zeigen wesentlich weniger Fremdmaterial, welches fest an der Oberfläche anhaftet. • Die gleichen Verunreinigungen (Bild II) sind auch auf C I vorhanden. • EDX der verschmutzten Bereiche ergibt eine Mischung aus Fe und Cr (Nachweisgrenze)

Probe / Reinigung	C III / wie C II und manuelle Reinigung* unmittelbar vor der LSP
Ergebnis vor der LSP 	<ul style="list-style-type: none"> • Weder in der SE- noch in der BSE-Darstellung können Verunreinigungen gefunden werden. • SE-Aufnahme (Bild III) zeigt sehr gut die Struktur der Oberfläche nach dem Läppen (* Abbürsten der Probenoberfläche)
Ergebnis nach der LSP	
<ul style="list-style-type: none"> • Mit bloßem Auge wird auf C I eine stark und auf C II eine weniger stark gestörte Oberfläche wahrgenommen. C III zeigt die „Orangenhaut-Struktur“ in typischer Ausprägung. • SE-Aufnahmen von C I (Bilder IV bis VI) zeigen Abplatzungen und Einschlüsse (in geringerem Umfang auch auf C II) • EDX-Analysen aller untersuchten Einschlüsse ergeben Spuren von Fe, Ca und Ti – letzteres stammt wahrscheinlich aus dem Polierumfeld. 	
	 

Bei der Kohlenstoff-Sauerstoff-Verbindung auf C I handelt es sich (der Zusammensetzung nach) um Haut und nicht um Rückstände von Putz- oder Verpackungsmaterial. Die Proben wurden von Hand geläppt, so befinden sich auch Hautpartikel im Läppmittel. Bei den Spuren von Eisen und Chrom (auf C I

und C II) handelt es sich nachweislich um Abriebpartikel der Lappscheibe. Die Ausplatzungen (Bild IV) können entstehen, wenn die Verunreinigungen beim Erweichen der Quarzglasoberfläche während der LSP mit dem SiO_2 neue Glaszusammensetzungen bilden. Diese weisen dann ein völlig anders Ausdehnungs- und Abkühlverhalten als Quarzglas auf und verursachen Spannungen in Mikrobereichen der Oberfläche, was im Extremfall zu Zugspannungen und – in deren Folge – zum Ausplatzen des „fremden“ Glases beim Abkühlen führen kann. Die Fremdstoffe sind dann nicht mehr auf der Oberfläche zu finden. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass es zwingend erforderlich ist, die Oberfläche nach der Vorbearbeitung durch Schleifen oder Läppen gründlich zu reinigen. Aus den REM-Untersuchungen der geschliffenen Oberflächen ist erkennbar, dass sich Partikel aus dem Werkzeug aber auch aus dem Kühlmittel (verunreinigt durch zuvor bearbeitete Keramik) leicht und sehr tief in die porige Struktur setzen. Ebenfalls nachgewiesen wurden Partikel aus den verwendeten Läppmitteln. Eine Reinigung im Ultraschallbad und daran anschließend eine gründliche manuelle Reinigung sind unerlässlich. Auch muss die Polierumgebung sehr sauber gehalten werden. Von einer reinen Absaugung des Arbeitsbereiches sollte jedoch Abstand genommen werden. Durch den Luftstrom werden Verunreinigungen aus der Umgebung regelrecht auf die erweichte Oberfläche gezogen. Dieser Effekt wurde bereits in den Voruntersuchungen beobachtet (und ebenfalls durch REM/EDX nachgewiesen). Das Unterlassen der Absaugung erfordert ein abtragarmes Laserpolierverfahren, da starkes Abdampfen der Oberfläche einen Film aus SiO_2 -Nanopartikeln auf der polierten Oberfläche hinterlässt, wenn keine Absaugung erfolgt. Gleichzeitig führt das Unterlassen der Absaugung zu geringerem Materialabtrag, da die in 3.6.5 beschriebene Verdampfung (eigentlich Verdunstung) in unbewegter Atmosphäre (also ohne

Absaugung) langsamer von stattem geht. Es wird ein Poliovorgang angestrebt, bei dem die SiO_2 -Verdampfung vernachlässigbar ist. In einer zukünftigen industriellen Anwendung der Laserstrahlpolitur wird der Einsatz einer Flow-Box (in der eine schwache laminare Luftströmung und Hochleistungsfilter reinraumähnliche Bedingungen schaffen) empfohlen.

Die Proben müssen nach der mechanischen Vorbearbeitung und Reinigung in staubarmer Umgebung gelagert und vor Verschmutzungen geschützt werden.

6.3.3 *Materialspannungen*

In der Simulation, behandelt in Kapitel 3.6.2, werden Spannungen beschrieben, die während der LSP auf Grund des in der Tiefe stark begrenzten Energieeintrages in die Quarzglasproben entstehen. Diese Spannungen treten z. T. nur kurzzeitig auf, ein Teil davon wird jedoch auf Grund der raschen freien Abkühlung im Quarzglaskörper eingefroren. Der in 3.6.3 beschriebene Kühlprozess beseitigt diese Spannungen. Es ist jedoch interessant zu untersuchen, wie sie sich zuvor im Quarzglas darstellen, ob sie bereits während der LSP beeinflusst werden können und welche Folgen sie haben, wenn sie nicht rechtzeitig oder in ausreichendem Maße abgebaut werden. Die Abb. 6-8 zeigt Spannungen in unterschiedlich großen Proben. Es handelt sich dabei um spannungsoptische Darstellungen, die in einem Stereomikroskop mit Hilfe zweier gekreuzter Polarisatoren im Durchlicht aufgenommen wurden. Die laserstrahlpolierte Probe liegt dabei zwischen den um 90° zueinander gedrehten Filtern. Der erste erzeugt linear polarisiertes Licht, der zweite löscht dieses durch erneute lineare Polarisierung aus. Die Spannungen in der Probe verändern die Brechzahl des Quarzglases, führen zu Gangunterschieden in den Lichtwellen, die so den zweiten Filter passieren können und danach interferieren. Bei den Bildern in Abb. 6-7 handelt es sich folglich um qualitative Darstellungen der Spannungen.

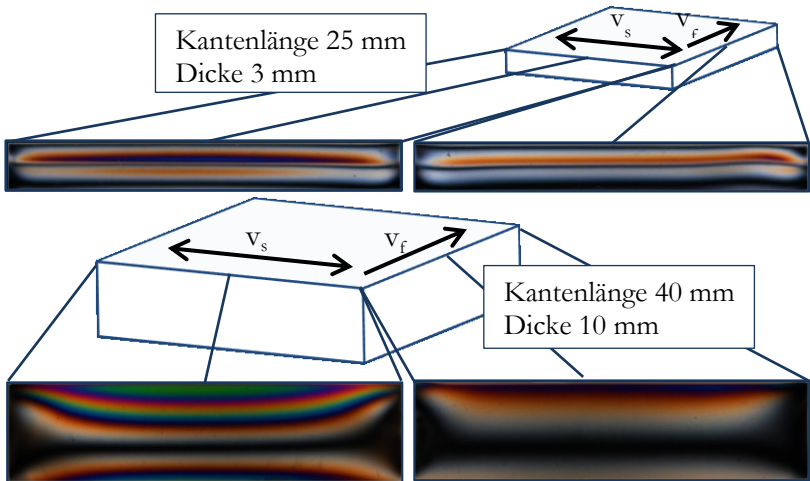


Abb. 6-7: Spannungszustand nach der Laserstrahlpolitur in unterschiedlich großen Proben

Bei Betrachtung der ungekühlten Probe (Kantenlänge 25 mm) können die Polierrichtung und die entstehende Temperaturverteilung nachvollzogen werden. Senkrecht zur Vorschubrichtung veranschaulicht die vollkommen symmetrische Spannungsverteilung die gleichmäßige Erwärmung.

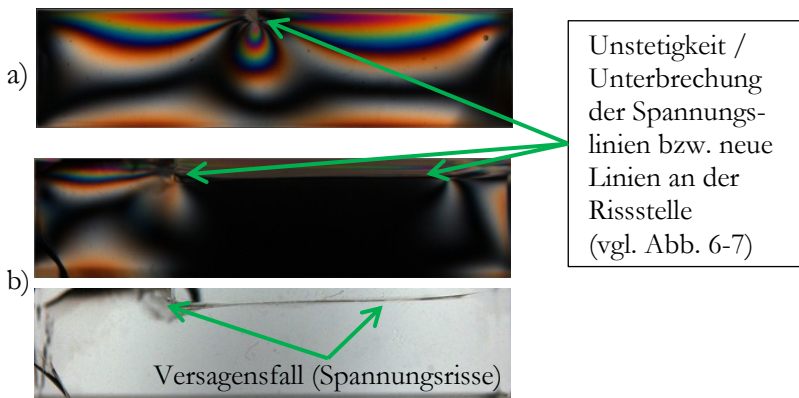


Abb. 6-8: Spannungsrisse in laserstrahlpolierten Proben

Parallel zur Vorschubrichtung ist die Spannung am Anfang der Probe geringer und erhöht sich zum Probenende hin. Dieser Verlauf passt zur charakteristischen Temperaturkurve (s. a. Abb. 6-4). Etwa in der Mittelebene der Probe kommt es zu einem Wechsel zwischen Zug- und Druckspannung.

Die Bilder der wesentlich größeren Probe 2 (Kantenlänge 40 mm) zeigen Restspannungen nach unzureichender Kühlung. Diese gehen direkt von der Oberfläche aus, zeigen keinen Spannungswechsel und sind ebenfalls entsprechend der Polierrichtung symmetrisch verteilt. Weiterhin sind Gegenspannungen auf der unpolierten Seite erkennbar. Eine Erhöhung der Spannung am Probenende ist hingegen nicht sichtbar, da diese durch den Kühlprozess bereits abgebaut wurde.

In Abb. 6-8 a) ist die große Probe aus Abb. 6-7 ca. 2 Wochen nach der ersten Aufnahme und nach spontanem Eintritt des Versagensfalles (ohne äußere Einwirkungen) zu sehen. Der Riss läuft senkrecht von der Oberfläche ca. 1 mm tief in die Probe. Im normalen Mikroskopbild ist er kaum zu erkennen aber die Spannungslinien zeigen seine Position. In den Bildern b) ist eine weitere gerissene Probe des gleichen Typs zu sehen. Hier verläuft der Riss zunächst 2 mm senkrecht in die Tiefe, dann parallel zur Oberfläche und weiter in voller Probenbreite (ins Bild hinein). Es spaltet sich eine ca. 2 mm dicke Schicht von der Probenoberfläche ab, bleibt aber mit der Probe noch fest verbunden. Diese 2 mm entsprechen auch der Tiefe der Spannungen in der ungekühlten 25er-Probe in Abb. 6-7 und in weiteren untersuchten Proben. Sie sind damit auch ein Maß für die Tiefe der durch die LSP eingebrachten Spannungen. Untersuchungen am bildgebenden Polarimeter StrainMatic¹² erlauben eine quantitative Aussage über die Materialspannungen anhand des optischen Gangunterschiedes. Dieser ist proportional zur Spannung, wird in nm/cm angegeben und sollte bspw. für einfache Vergrößerungsgläser oder Sucheroptiken kleiner 20 nm/cm

¹² Gerät der ilis GmbH, Messung bei der Carl Zeiss AG, Jena

sein. [Blic08] Die Tabelle 6-4 zeigt die Ergebnisse der Spannungsmessungen mit dem Polarimeter StrainMatic an unterschiedlichen laserstrahlpolierten Proben.

Tabelle 6-4: Optische Weglängendifferenz (OPD) unterschiedlicher laserstrahlpolierter Proben

Probenoberflächenkategorie						T °C	OPD _{max} nm/cm	OPD _{mittel} nm/cm
	Größe mm	Bearbeitungsparameter						
			W	mm/min	mm/s			
B	25x25x4	beidseitig	760	30	800	2193	36	10
C	25x25x4	einseitig	710	25		2125	36,5	13,7
C	15x15x4	einseitig	580	80		2010	10,1	3,4
C	15x15x4	beidseitig	580	70		2163	19,8	5,9
C	50x50x4	einseitig	1000	12,5		1925	43,7	11,9
C	50x50x4	beidseitig				1904	56,7	16,2

Im Mittel liegen die optischen Gangunterschiede sämtlich in einem Qualitätsbereich, der für einfache Optiken ausreicht. Bei den kleinen Proben bleiben sogar die Maximalspannungen (hauptsächlich am Probenrand und -ende) im Toleranzbereich. Generell gilt, mit abnehmender Probengröße sinken die Spannungen, da die Probe gleichmäßiger und stärker durchwärmt wird. Ein direkter Zusammenhang zwischen Maximaltemperatur und Spannung ist nicht erkennbar. Die beidseitige Politur ohne Zwischenkühlung führt lediglich zu einem sehr geringen Anstieg der Spannungen.

6.4 Einfluss der LSP auf mechanische Eigenschaften der Quarzglasproben

6.4.1 Begründung der Untersuchungen

Im vorangegangenen Abschnitt wurde ausführlich auf die qualitative Beeinflussung der Quarzglasoberflächen eingegangen. Auch die auftretenden Materialspannungen und deren Auswirkung (z. B. auf die optische Qualität) wurden bereits diskutiert. Die folgenden beiden Abschnitte behandeln die Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften der verwendeten Quarzproben. Sie dienen der Klärung, ob Härte und Festigkeit der Erzeugnisse beeinflusst und durch die LSP bestenfalls verbessert werden können.¹³

6.4.2 Oberflächenhärte

Für die Untersuchung zur Beeinflussung der Oberflächenhärte des laserpolierten Quarzglases werden Vergleichsmessungen am Fischerscope HM2000 durchgeführt. Verglichen werden eine herkömmlich mechanisch polierte Oberfläche und eine mit optimalen Parametern laserstrahlpolierte. Der Vergleich zu einer unpolierten, d. h. relativ rauen Oberfläche ist auf Grund des Härteprüfverfahrens (Diamanteindruck) nicht zulässig.

Das Prüfverfahren ist in [Helm05] ausführlich beschrieben. Die Mikrohärtebestimmung erfolgt gemäß DIN EN ISO 14577, wobei nach dem Kraft-Eindringtiefenverfahren eine Vickers-Pyramide zunächst mit ansteigender Prüfkraft quasi kontinuierlich in das zu überprüfende Material eingedrückt und anschließend entlastet wird. Dabei erfolgt eine permanente Messung der jeweiligen Eindringtiefe. Unter Einbeziehung des geometrischen Zusammenhangs zwischen Eindringtiefe und Indentergeometrie führt die Messung zum Härtewert nach Martens (HM), der durch die geräteeigene Software in die Härte nach Vickers (HV 0,2) umgerechnet wird. [Helm05]

¹³ Die untersuchten laserstrahlpolierten Proben sind gekühlt.

Die Kurven in Abb. 6-9 zeigen die Mittelwerte MW der Einzelmessungen aus mehreren Messzyklen mit der zugehörigen Standardabweichung.

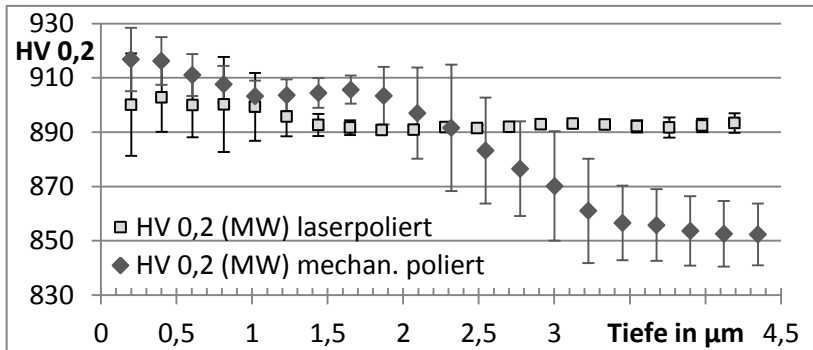


Abb. 6-9: Vergleichender Härteverlauf mechan. und laserstrahlpolierter Quarzglasproben¹⁴

Der Härteverlauf der laserstrahlpolierten Oberfläche verhält sich we-

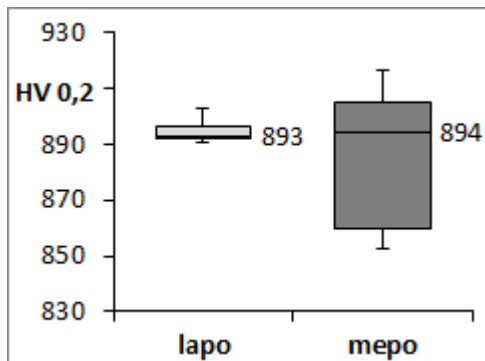


Abb. 6-10: Härtevergleich – mechanische Politur vs. LSP (mepo vs. lapo)

sentlich konstanter, sowohl hinsichtlich der Eindringtiefe als auch hinsichtlich der Einzelmesswerte. Das wird noch deutlicher im Box Plot (Abb. 6-10). Der Medianwert beider Polierarten, also der Mittelwert der Daten innerhalb der Box (umfasst die mittleren 50 % der Härteverläufe), ist – über die vollständige Tiefe betrachtet – gleich und beträgt ~ 893 HV 0,2. Die Streuung der lapo-Werte (inkl. ihrer Extrema) fällt wesentlich geringer aus als die der mepo-Werte. Es ist folglich bei den laserstrahlpolierten Oberflächen kein Härtever-

¹⁴ Die Mikrohärteprüfung nach Vickers erfolgt mit einer Prüfkraft von 0,2 N.

kleiner 890 HV 0,2 zu erwarten. Bei den mechanisch polierten Oberflächen muss nach diesen Untersuchungen mit einer Schwankung der Härtewerte von $852 < \text{HV } 0,2 < 916$ gerechnet werden. Ein interessanter Effekt zeigt sich in der Tiefe von $2 \mu\text{m}$. Dort fällt die Härte der mechanisch polierten Oberfläche, die bis dahin parallel zu der der laserstrahlpolierten verläuft, deutlich ab, um dann ab einer Tiefe von ca. $3,8 \mu\text{m}$ wieder einen relativ konstanten und erneut parallelen Verlauf zur Abszisse anzunehmen. Eine Ursache dieser oberflächlichen Härtesteigerung kann nach [Scho88] die Verdichtung der Oberfläche aufgrund mechanischer Deformation (welche durch die Druckkräfte beim mechanischen Polieren verursacht wird) sein. Weiterführenden Untersuchungen zur mechanischen Politur von Quarzglas könnten dazu beitragen, diesen Effekt ausführlicher zu untersuchen. Das ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit, weshalb hier abschließend festgestellt wird, dass die laserstrahlpolierte Oberfläche im Vergleich zur mechanisch polierten keine höhere Härte aufweist aber eine konstantere. Zum Vergleich mit den Härteangaben im Material-Datenblatt des Herstellers ist eine Umrechnung des Härtewertes HV 0,2 in die Mikro-Härte nötig. Nach [Kotz09] ist der Umrechnungsfaktor 9,807. Es ergibt sich also eine Mikro-Härte der mechanisch polierten Oberfläche von 8355 bis 8980 N/mm^2 . Sie liegt in den im Datenblatt angegebenen Grenzen (vgl. S. 39 Tabelle 3-3). Die laserstrahlpolierte Oberfläche weist eine Mikrohärtigkeit von 8730 N/mm^2 auf.

6.4.3 Biegebruchfestigkeit

Im Datenblatt wird für das verwendete HSQ300 die Biegebruchfestigkeit mit 67 N/mm^2 [Hera09] angegeben¹⁵. Dieser Wert ist offenbar ein Standardwert, da er sich in den Datenblättern unter-

¹⁵ Nach Aussage der Heraeus Quarzglas GmbH & Co.KG wurde die Biegebruchfestigkeit des Materials in einer Serie von 3-Punkt Biegebruchversuchen ermittelt. Die Spannweite zwischen den Auflagepunkten betrug 100 mm. Als Probekörper dienten planparallele, fein geschliffene und an den Kanten gefasteten Barren mit den Maßen 10 mm x 10 mm x 130 mm

schiedlicher Hersteller für verschiedene Quarzglasstypen findet. Gleichzeitig wird stets darauf hingewiesen, dass dieser Wert, so wie alle Angaben über mechanische Belastbarkeit, stark von der Oberfläche und der Kantenqualität abhängig ist.

Um den Einfluss der LSP auf die Biegebruchfestigkeit σ_{bB} zu untersuchen, werden 2 unterschiedliche Biegetests¹⁶ an geläppten (unpolierten) und laserstrahlpolierten Proben durchgeführt. Im Doppelringbiegeversuch (in Anlehnung an DIN EN 1288-2) wird der Einfluss der Kantenqualität ausgeschlossen. Von den 20 zu untersuchenden Proben der vorgeschriebenen Größe [30 x 30 x 0,75-1,5] mm³ werden 10 beidseitig laserpoliert und gekühlt.

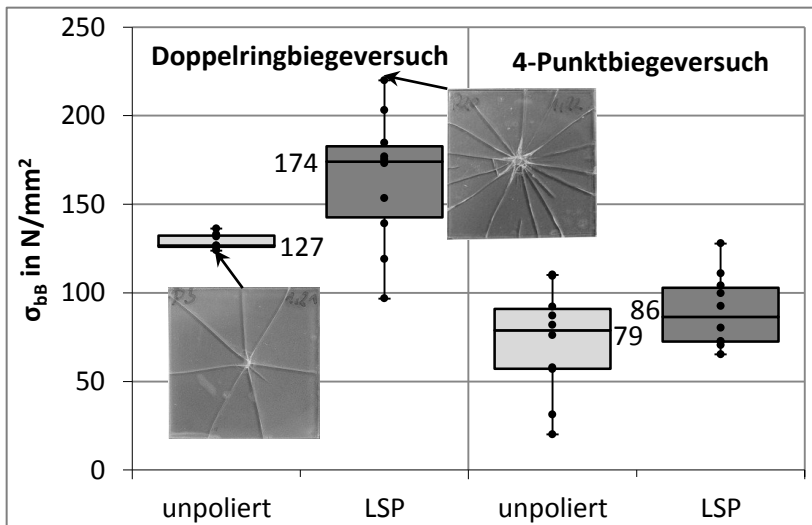


Abb. 6-11: Biegefestigkeit unpolierter und laserstrahlpolierter Quarzglasproben

Der Boxplot des Doppelringbiegeversuchs in Abb. 6-11 zeigt die Ergebnisse. Bereits die unpolierten Proben weisen im Mittel mit $\sigma_{bB} = 127 \text{ N/mm}^2$ eine deutlich höhere Festigkeit auf, als im Datenblatt angegeben. Weiterhin streuen 8 der 10 Messwerte (2 Aus-

¹⁶ Durchgeführt bei SCHOTT Technical Glass Solutions GmbH.

reißer) kaum. Das linke Foto zeigt die unpolierte Probe P3 mit der geringsten Biegefestigkeit. Durch die LSP wird eine mittlere Biegefestigkeit von 174 N/mm^2 erreicht, also eine Erhöhung um 37 %. Die stärkere Streuung der Werte der laserstrahlpolierten Proben resultiert aus den in 6.3.2 beschriebenen Mikroschädigungen der Quarzglasoberfläche durch Verunreinigungen während der LSP. Dennoch liegt σ_{bB} bei 8 von 10 laserpolierten Proben höher als der Maximalwert der unpolierten Proben. Den Maximalwert von 219 N/mm^2 erreichte die polierte Probe P20.

Durch den 4-Punkt-Biegeversuch – in Anlehnung an DIN 1288-3 – wird die Biegebruchfestigkeit unter Einschluss der Kantenfestigkeit bestimmt. Es werden 10 unpolierte und 10 polierte und gekühlte Proben der Größe $[80 \times 48 \times 2] \text{ mm}^3$ untersucht. Alle Proben sind innerhalb der Biegerollen gebrochen und damit per Definition gültig. Der Mittelwert der unpolierten Proben liegt mit 79 N/mm^2 schon näher an den Datenblattangaben. Zur eigenen Absicherung des Herstellers ist es nur folgerichtig, den niedrigsten Wert im Datenblatt anzugeben, zumal der Hersteller in der Regel keine Kenntnis über die Verwendung des Materials beim Kunden hat und somit den Einfluss der Kantenqualität auf die beim Kunden gefertigten Teile nicht beurteilen kann. Da alle untersuchten Proben lasergeschnitten sind, haben auch die unpolierten geglättete, gewissermaßen polierte, Kanten. Daraus folgt die um 18 % höhere Festigkeit gegenüber der Angabe im Datenblatt. Diese Probenvorbereitung wurde deswegen so gewählt, weil davon ausgegangen wird, dass die Außengeometrie der Quarz-glaselemente stets lasergetrennt ist, wodurch bereits im Vorfeld eine Steigerung der Biegebruchfestigkeit erreicht wird. Gleichzeitig kann die Erhöhung dieses Wertes (durch die LSP) nur bei gleicher Kantenqualität – also nur auf Grund der tatsächlichen Oberflächenbearbeitung – ermittelt werden. Sie beträgt 9 % und zeigt eine geringere Streuung als die Festigkeitswerte der unpolierten Proben. Insgesamt beträgt die Steigerung der Biegebruchfestigkeit durch die Laserstrahlpolitur gegenüber der Angabe im Datenblatt 28%.

6.5 Temperaturverteilungsanalyse

6.5.1 Zielstellung des Vergleichs der angewendeten Temperaturmessverfahren

Es wurde schon mehrfach darauf hingewiesen, dass die Temperatur bei der LSP eine entscheidende Rolle spielt. Deshalb soll sie an dieser Stelle näher betrachtet werden. Dabei wird neben der punkt- und linienförmigen Temperaturmessung durch die Pyrometrie auch die flächenhafte Temperaturfeldanalyse durch die Wärmebildkamera betrachtet. Weiterhin sollen die mittels Pyrometrie erfassten Daten hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf die gesamte Polierfläche hin untersucht werden, da in den meisten industriellen Anwendungen die Temperaturüberwachung und -kontrolle mit einem Pyrometer erfolgen soll. Nur so können Aufwand und Kosten minimiert werden.

6.5.2 Punkt- und linienförmige Temperaturmessung

Die punktförmige Temperaturmessung mit dem Pyrometer IE 120/51-L ist bei der LSP von Quarzglasoberflächen nur begrenzt von Nutzen. In 5.4.1 diente sie der Darstellung der Temperaturverteilung innerhalb des defokussierten Laserstrahles auf der zu polierenden Oberfläche und zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Temperaturmessung. Auch zur Ermittlung des Emissionsgrades (vgl. Abb. 5-12, S. 99) konnte sie sinnvoll eingesetzt werden. In einem zukünftigen, automatisierten Prozess kann sie nur dann angewendet werden, wenn der Laserstrahlpolierprozess so weit beherrscht wird, dass eine gleichmäßige Temperaturverteilung auf der gesamten Polieroberfläche garantiert ist.

Die linienförmige Temperaturmessung kann auf 2 Arten durchgeführt werden. So kann das Pyrometer entweder auf der Achse am Scanner mitgeführt werden (so wie bisher stets beschrieben) oder der Messpunkt des Pyrometers wird durch einen eigenen einachsigen Scanner über die zu polierende Oberfläche bewegt. Letztere Methode wurde in Voruntersuchungen getestet, zeigt aber keine zufriedenstel-

lenden Ergebnisse. Nachteile dieser Methode sind der verdoppelte Geräteaufwand (der Scanner SCA 120 hat die Größe des Pyrometers), der erheblich verkürzte Messabstand von 250 auf 180 mm und die Verminderung des Emissionsgrades auf 0,91. Da die Strahlung den Scanner und die Scanneroptik passieren muss verkürzt sich der Messabstand und der Strahlungsverlust an den Scanneroptiken (Spiegel und Fenster) muss durch die Anpassung des Emissionsgrades ausgeglichen werden. Auch der Einstellbereich der Scangeschwindigkeit ist ungenügend, da er mit $v_{SCAmin} = 3 \text{ m/min}$ für die typische Vorschubbewegung zu schnell und mit $v_{SCAmax} = 250 \text{ m/s}$ für die Laserscannerbewegung (800 mm/s) zu langsam ist. Für die durchzuführenden Untersuchungen wird folglich auch weiterhin die erste Variante des mitgeführten Pyrometers gewählt. Sie besitzt zusätzlich den Vorteil, dass das Pyrometer in einen relativ spitzen Winkel zum bearbeitenden Laserstrahl gebracht werden kann.

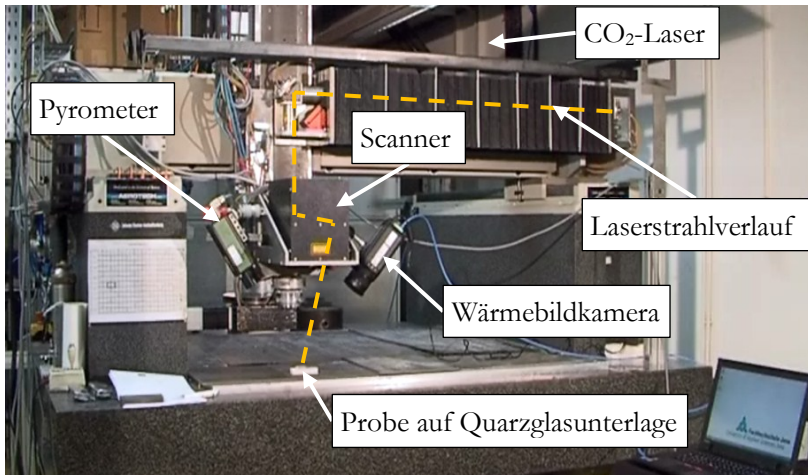


Abb. 6-12: Temperaturmessung mit Pyrometer und Wärmebildkamera bei der LSP am SM1500P (Anlage des Günter-Köhler-Instituts für Füge-technik und Werkstoffprüfung GmbH)

Abb. 6-12 zeigt den Messaufbau mit Pyrometer, angeordnet wie in allen vorangegangenen und weiteren Untersuchungen und die

zusätzlich angebrachte Wärmebildkamera (TCam). Spitzere Winkel der Temperaturmessgeräte zum Laserstrahl sind mit den verwendeten Geräten und deren Arbeitsabstand nicht möglich. Wird das Pyrometer auf die Mitte der Laserscannerlinie in der Probenmitte ausgerichtet (Justage im eingeschalteten Strahl nach Temperaturmaximum), dann entstehen die charakteristischen Temperaturkurven (vgl. Abb. 6-4; S. 134) mit den zur Auswertung genutzten Maximaltemperaturen am Probenende.

6.5.3 Flächenhafte Temperaturmessung

Durch den Einsatz der in 3.4.2 und 3.4.3 vorgestellte TCam können Daten über die Temperaturverteilung auf der ganzen Quarzglasprobenoberfläche, während der gesamten LSP gewonnen werden. Für die Kamera gelten dabei ähnliche Bedingungen zur Messwerterfassung wie für das Pyrometer. Der Emissionsgrad kann sowohl vor der Messung als auch danach in der Software der Kamera eingestellt werden. Hierin liegt ein großer Vorteil des Messprinzips, da zunächst nur die Strahlung aufgenommen und erst im Anschluss materialentsprechend ausgewertet wird. Zur Auswertung der Messdaten gibt es eine umfassende Software, mit der neben den einfachen Bildern in temperaturabhängigen Falschfarben auch Temperaturverläufe (Minimum, Maximum, Mittelwert etc.) ausgewählter einzelner Punkte, Linien und Bereiche aufgezeichnet werden können. Innerhalb dieser ist es auch möglich, den Emissionsgrad zu verändern. So kann bspw. auf unterschiedliche Materialien im Aufnahmebereich Rücksicht genommen werden. Der Messwellenlängenbereich der Kamera ($7,5 \dots 9,9 \mu\text{m}$) erfordert eine erneute Emissionsgradermittlung. Hierfür wurde der DC020-Laser und das Pyrometer IN140-5/H genutzt. Letzteres ist ein Nachfolgegerät des IE 120/51-L mit einem variablen Messabstand (a_{pyro}), kleinerem Messfleck ($1,2 \text{ mm}$ bei $a_{pyro} = 175 \text{ mm}$) und einer 10-fach kürzeren Erfassungszeit von 10 ms . Der in den Vergleichsmessungen ermittelte und in den weiteren Versuchen angewendete Emissionsgrad beträgt $\varepsilon = 0,95$.

Für die thermografischen Untersuchungen werden zunächst je 3 einzelne Versuche der drei bereits in 5.4 vorgestellten Versuchsreihen wiederholt: Der Versuch mit der niedrigsten und der höchsten Temperatur sowie der mit der niedrigsten Rauheit bei minimalem Materialabtrag. Die Proben liegen dabei auf der, in den Versuchsreihen stets verwendeten, Quarzglasunterlage aus OM 100. Diese wird an den Stellen, an denen sie nicht von den Proben überdeckt wird, ebenfalls durch die Laserstrahlung erwärmt. Das ist in den Bildern vor allem am jeweils linken Probenrand zu sehen. Die Abb. 6-13 zeigt den Vergleich zweier Proben, die mit den nachstehend genannten Parameterkombinationen poliert wurden und in den Versuchsreihen 2 (Abb. 5-29 S.123) und 3 (Abb. 5-30 S.125) zu den besten Ergebnissen geführt haben:

- C331: $P = 510 \text{ W}$; $v_f = \text{const.} = 20 \text{ mm/min}$; $v_s = 1000 \text{ mm/s}$
- C343: $P = 670 \text{ W}$; $v_f = 50 \text{ mm/min}^{17}$; $v_s = 800 \text{ mm/s}$

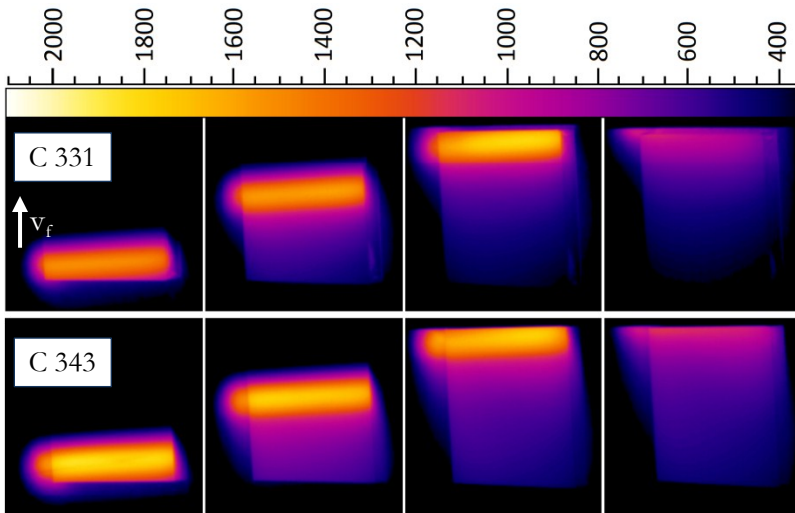


Abb. 6-13: Thermografische Bildfolge - LSP auf Probe C331 und C343 (variierte Prozessparameter)

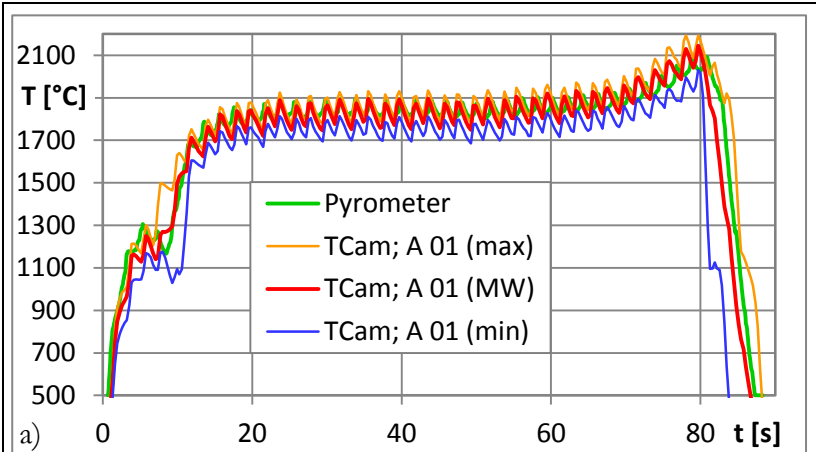
¹⁷ Vorschub aufgeteilt in 2 mm mit 20 mm/min; 19 mm mit 50 mm/min; 4 mm mit 65 mm/min)

Die höhere Leistung und die im Vergleich zum Gesamtvorschub reduzierte Vorschubgeschwindigkeit am Probenanfang von C343 führen dort zu höherer Temperatur und im Verlauf zu einer etwas gleichmäßigeren Temperaturverteilung entlang der Vorschubrichtung. In Scanrichtung liegt, wie erwartet, eine gleichmäßige Temperaturverteilung vor, so dass tatsächlich von einer „Polierlinie“ gesprochen werden kann. Diese wird durch die Veränderung der Scangeschwindigkeit nicht beeinflusst – ebenfalls eine Bestätigung der Ergebnisse aus der Statistischen Versuchsplanung. Am Ende des Polierprozesses hat die Probenoberfläche eine Temperatur von ca. 400 °C.

6.5.4 Rückschlüsse von den Ergebnissen der Kameramessung auf die Pyrometrie

Um die von Pyrometer und TCam gemessenen Temperaturen zu vergleichen, werden mit Hilfe der Kamerasoftware Temperaturkurven aus dem Filmmaterial erstellt. Das Wärmebild in Abb. 6-14 b) zeigt die Berechnungsgrundlage für den Durchmesser des Pyromettermessflecks. Linie L01 ist die Probenlänge von 25 mm. Ihre Länge wird im Kamerabild in Pixel (px) angegeben. So kann die Länge von L02 berechnet werden, die 1,4 mm beträgt und damit dem Durchmesser des Pyromettermessflecks entspricht. Sie wird von der Kreisfläche (A01) umschlossen, die damit dem Pyromettermessfleck gleichkommt. Die Messwerte des Pyrometers sind über seine Spotgröße gemittelt und werden nun mit dem Mittelwert der A01 der TCam verglichen. Im Temperatur-Zeit-Diagramm in Abb. 6-14 liegen die grüne und die rote Kurve der beiden Messungen dicht zusammen. Gerade im mittleren Bereich der Probe, wo die Temperatur konstant verläuft, sind sie deckungsgleich. Nun kann mit Hilfe der höheren Auflösung der TCam ($1 \text{ px} \hat{=} 0,18 \text{ mm}$) die Maximaltemperatur im Bereich des Messfeldes (A01 max) angegeben werden. Sie liegt im Schnitt 40 K höher als der Mittelwert. Die Minimaltemperatur im Messfleck (A01 min) liegt durchschnittlich 70 K unter dem Mittelwert. Der Grund für die Asymmetrie (zum

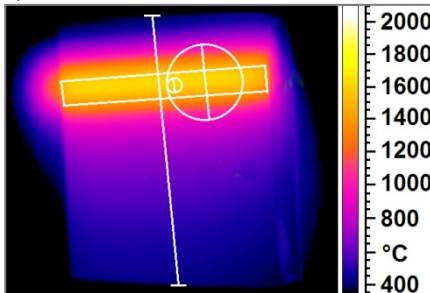
Maximalwert) ist die gaußförmige Energieverteilung im Laserstrahl. Da die Temperaturkurven nicht geglättet sind (wie in Abb. 6-15) wird die frequenzkonstante Schwingung der Temperaturwerte sichtbar.



Erklärung der Messstrecken und -felder (vgl. Abb. 6-14 b):

- L01 ~ Probenlänge, Maßstab für weitere Linien/Flächen
- A01 ~ umschließt L02 (vgl. Abb. 6-15), entspr. Pyrometermessfleck
- A03 ~ umschließt L03, entspricht Laserstrahldurchmesser
- A04 ~ 3 mm breiter Oberflächenbereich (ausgewertet in Abb. 6-15)

b)



c)

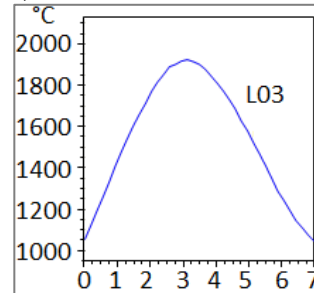


Abb. 6-14: a) Vergleich der durch Pyrometer und TCam gemessenen Temperaturverläufe auf C331 b) Darstellung der Messbereiche; c) Temperaturprofil der „Polierlinie“ (quer)

Bei den Proben mit 25 mm Kantenlänge passiert der schnell scannende Laserstrahl den Mittelpunkt der Polierlinie (und damit die Messflecke) im zeitlichen Abstand von 47 ms. Durch die Erfassungszeit von Pyrometer (100 ms) und Kamera (8 ms) hat somit der Laserstrahl einen variierenden Abstand zu den temperaturermessenden Geräten, woraus sich die Schwankungen der Temperaturwerte ergeben. Diese betragen im Mittel ± 50 K.

Linie L03 entspricht 7 mm und damit dem Durchmesser des Laserstrahls auf der Probenoberfläche. Die Temperaturverteilung entlang dieser Linie (Abb. 6-14 c)) ist annähernd symmetrisch (etwas flacherer Verlauf am Ende durch langsamere Abkühlung) und entspricht in ihrer Form und in ihren Werten denen aus Abb. 5-14 auf Seite 102.

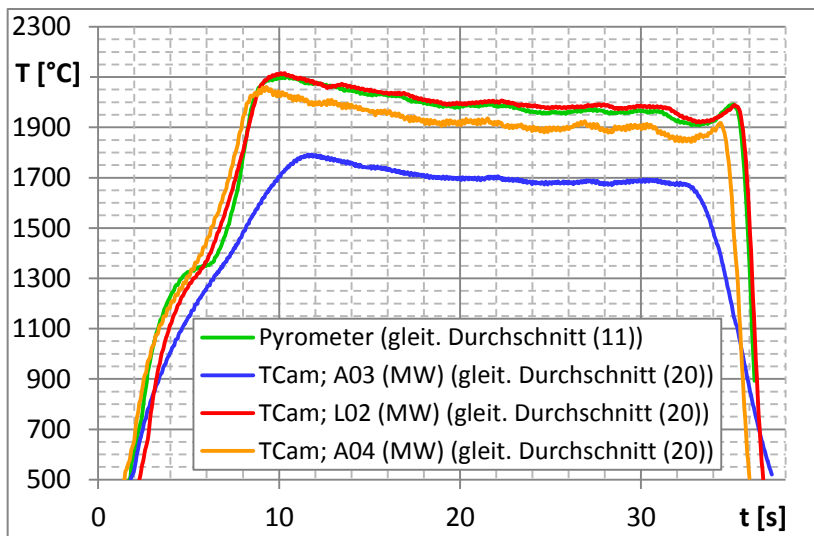


Abb. 6-15: Vergleich der durch Pyrometer und TCam gemessenen Temperaturverläufe auf C343

Bei der LSP der Probe C 343, deren Temperaturkurven in Abb. 6-15 dargestellt sind, wurde das Konzept der angepassten Vorschubgeschwindigkeit hinsichtlich des Temperaturverlaufs untersucht. Bei den Kurven im Diagramm handelt es sich um die

geglättete Darstellung der realen Messwerte. Dadurch wird der Temperaturverlauf deutlicher.

Das Konzept der angepassten Vorschubgeschwindigkeit v_f führt zu einem Temperaturmaximum am Probenanfang, welches dann aber in einen relativ konstanten, wenn auch leicht abfallenden Temperaturverlauf übergeht. Das Beschleunigen am Probenende bewirkt nochmals ein leichtes Abfallen der Temperatur, gefolgt von einem Anstieg auf Grund des Wärmestaus. Insgesamt ist durch die Variation des Vorschubs v_f in y-Richtung der Temperaturverlauf ausgeglichener, die Temperatur verändert sich während der LSP nicht mehr so stark. Es ist jedoch notwendig, den Temperaturverlauf durch geeignete Maßnahmen weiter zu verbessern. Ein zusätzlicher Ansatz liegt in der bereits genannten Laserleistungssteuerung. Im folgenden Abschnitt 6.5.5 wird darauf näher eingegangen.

Die Temperaturkurve L02 in Abb. 6-15 veranschaulicht die durchschnittliche Temperatur im symbolischen Pyrometermessfleck. Es gibt sowohl bei Probe C331 als auch bei Probe C343 keinen Unterschied im Verlauf der Kurven von L02 und A01. Der Messbereich A03 ist ein Messfleck mit dem Durchmesser L03 – also entsprechend dem Laserstrahl. Man erkennt, dass die mittlere Temperatur in diesem Bereich über bzw. um 1700 °C liegt. Damit unterscheidet sie sich kaum vom angegebenen Erweichungspunkt des HSQ300 von 1710 °C. Innerhalb der Fläche A04 – 3 mm mal Probenbreite (25 mm) – kann bei einer mittleren Temperatur zwischen 2050 und 1900 °C von einer erweichten, zähfließenden Oberfläche ausgegangen werden. In diesem Bereich findet die Glättung statt. Da sich dieser, aus dem Grad der (Strahl-)Überlagerung (s. S. 70) resultierende, breite Bereich über die Oberfläche bewegt, entsteht keine Linienstruktur aus dem scannenden Verfahren.

In weiteren Versuchen wurde der Einfluss der unterschiedlichen Polierunterlagen – Graphit und OM 100 (mikroporöses Quarz-

glas) – und des Luftstromes der Absaugung auf die Temperatur untersucht. Die vom Pyrometer gemessene Maximaltemperatur ist bei der Quarzglasunterlage lediglich 25 K höher als auf Graphit. Ein Wert der zunächst nicht signifikant scheint, da er noch innerhalb der üblichen Schwankungsbreite der Temperatur liegt. Betrachtet man allerdings die Kurven in Abb. 6-16, dann liegt die fortlaufend durch die TCam gemessene maximale Poliertemperatur auf der Quarzglasunterlage stets ca. 50 K über der auf der Graphitunterlage. Die Unterlage wirkt isolierend und hält – wie erwartet – die Wärme in den Proben, statt sie (wie das Graphit) abzuleiten.

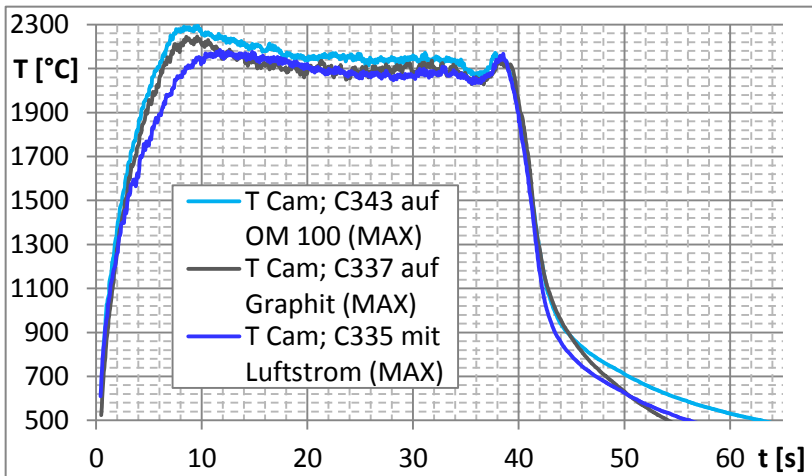


Abb. 6-16: Auswirkung der Polierunterlage und Absaugung auf den Temperaturverlauf (gleit. Ø (10))

Den größten Unterschied zwischen den Proben auf Graphit und Quarzglas stellt allerdings die Abkühlgeschwindigkeit dar. Das deutet sich im Diagramm bereits an. Die Kamera kann bis zu einer minimalen Temperatur von 330 °C messen. Die Abkühlzeit der Probe auf OM 100 vom Politurende bis auf 330 °C ist 33 s länger als die der Probe auf Graphit.

In Abschnitt 6.3.2 wurde bereits der Verzicht auf die Absaugung diskutiert. Wie sich diese auf die Oberflächentemperatur auswirkt, zeigt die Kurve von C335 in Abb. 6-16. Es tritt wirklich eine Verminderung der Poliertemperatur auf, die im Gesamtverlauf in etwa der auf der Graphitunterlage entspricht. Besonders stark ist sie zu Beginn der LSP. Es wird tatsächlich die so wichtige Aufwärmung der Probe vermindert. Auch die Abkühlung geht wesentlich zügiger von statten als ohne Luftstrom (20 s). Der Vergleich der Bilder in Abb. 6-17 (bei denen die Probenkontur zur Verdeutlichung der Temperaturverteilung eingezeichnet wurde) zeigt weiterhin, dass die Probenoberfläche bei der Politur auf OM 100 insgesamt stärker erwärmt und die Temperatur länger im Material gehalten wird als auf der Graphitunterlage oder beim Einsatz der Absaugung.

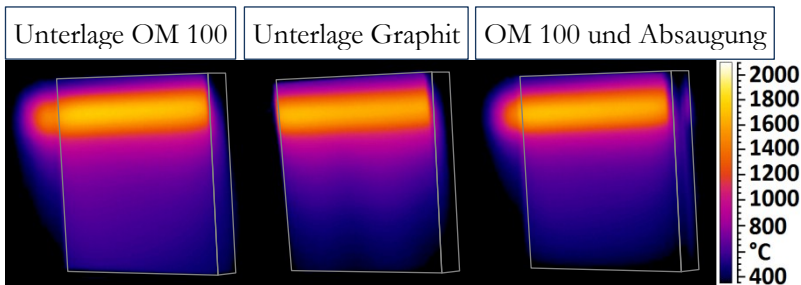


Abb. 6-17: Auswirkung von Polierunterlage und Absaugung auf die Temperaturverteilung

Die Untersuchungen an unterschiedlich großen Proben bringen hinsichtlich der Temperaturverteilung und deren Kontrolle mit Hilfe der Wärmebildkamera keine grundlegend neuen Erkenntnisse. Die Scangeschwindigkeit ermöglicht weiterhin die gewünschte stetige Polierlinie. Mit zunehmender Probendicke nimmt die Maximaltemperatur ab (Abb. 6-18).

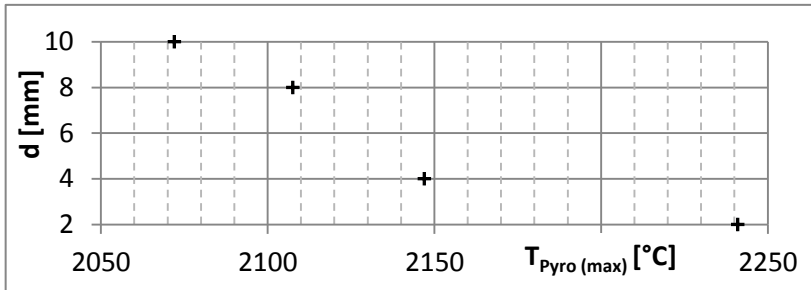


Abb. 6-18: Auswirkung unterschiedlicher Probendicke auf Temperatur

Diese Abnahme ist jedoch weit weniger wichtig als die, welche auftritt, wenn man die Kantenlänge der Proben vergrößert. Je größer diese ist, desto mehr Laserleistung ist notwendig, um bei gleichem Vorschub die notwendige Poliertemperatur zu erreichen. Bei der Vergrößerung der Kantenlänge von 25 auf 40 mm vermindert sich die (mit dem Pyrometer gemessene) Maximaltemperatur um 582 K und bei der Vergrößerung auf 50 mm sogar um 859 K. Reicht die Erhöhung der Leistung des verwendeten Lasers nicht mehr aus (z. B. bei der Kantenlänge von 50 mm), muss zusätzlich die Vorschubgeschwindigkeit reduziert werden. Die Wärmeleitfähigkeit des Quarzglases ist eine Ursache dieses Absinkens der Maximaltemperatur. Es wird (wie schon mehrfach angesprochen) eine gewisse Zeit benötigt, um die Probe aufzuwärmen, da die Effektivität der LSP zunimmt, je wärmer die Probe insgesamt ist. Die vollständige Klärung dieses Sachverhaltes erfordert weitere aufwendige Simulationen, die nicht mehr Teil dieser Arbeit sind.

Eine interessante Beobachtung konnte mittels Wärmebildkamera an der Seitenfläche der 2 mm dicken Proben gemacht werden. Diese zeigen, dass die Probe bis zur Auflagefläche durchgewärmt wird und dort noch etwa 1000 bis 1100 °C erreicht werden. Das sind Temperaturen im Bereich der unteren Entspannungstemperatur, wonach zu erwarten ist, dass diese Proben auch ohne zusätzliche Kühlung sehr gute Spannungswerte besitzen. Die

Spannungsoptische Untersuchung einer solchen 2 mm dünnen Probe hat einen mittleren optischen Gangunterschied von 2,9 nm/cm (Maximum 25,47 nm/cm) ergeben.

6.5.5 Möglichkeit eines temperaturgesteuerten Laserpolierprozesses

Wie schon an einigen Stellen angesprochen, bietet die Temperaturkontrolle mittels Pyrometer auch die Möglichkeit, den stark temperaturabhängigen Laserstrahlpolierprozess anhand dieses Parameters zu regeln. Da die Laserleistung ein Parameter ist, der einen sehr großen Einfluss auf die Zielgrößen hat und gleichzeitig einfach variiert werden kann, ist es sinnvoll, diese zur Regelung zu nutzen.

Ziel ist es, die Temperatur kontinuierlich (online) zu messen und die Leistung entsprechend dieser Messwerte anzupassen, um dann das gewünschte Poliererergebnis zu erzielen. Das Pyrometer ist mit der Regelung verbunden, und diese hat eine Verbindung zum Laser. Zur Regelung kann eine Temperatur- oder Leistungs-routine vorgegeben werden. Es werden Zeiten und gewünschte Temperaturen eingegeben, und die Laserleistung wird während der Bearbeitung (Politur) so angepasst, dass die eingestellte Temperatur erreicht wird. So findet ein ständiger Vergleich zwischen Soll- und Ist-Temperatur statt. [Kama08]

Erste Untersuchungen mittels einer speziell entwickelten Laserleistungsregelung zeigen das Potential dieses Ansatzes.

In Abb. 6-19 sind zwei Temperaturkurven, eine mit konstanten Parametern (Leistung und Vorschub) und eine bei Einsatz der Laserleistungsregelung zu sehen. Letztere Kurve zeigt im mittleren Probenbereich einen sehr konstanten Temperaturverlauf (Schwankungsbreite ca. 25 K) und das vollständige Fehlen der Temperaturüberhöhung am Probenende. Das starke „Überschwingen“ der Temperatur zu Beginn muss für einen zukünftigen Einsatz dieser Regelung noch unterbunden werden. Sie setzt

zu spät ein, so dass die Temperatur extrem ansteigt und massiv Material von der Oberfläche abgetragen wird.

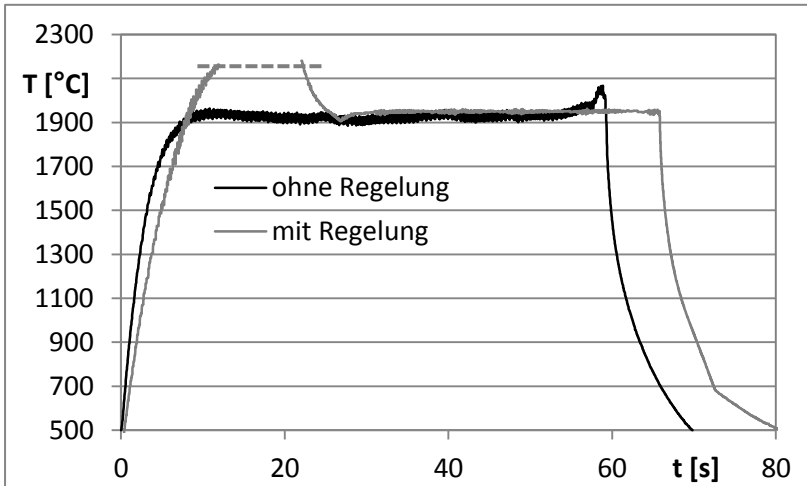


Abb. 6-19: Temperatur ohne und mit Laserleistungsregelung

7 Verfahrensmodell

7.1 Prozessmodell und Einflussgrößen – erreichbare Qualität und Grenzen

Das untersuchte, optimierte und weiterentwickelte Laserpoliervverfahren zur Glättung von Quarzglasoberflächen ist von vielen Parametern abhängig. Die Abb. 7-1 zeigt das schematische Prozessmodell. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der mit Abstand wichtigste Parameter die Temperatur ist. Ohne eine ausreichend hohe Poliertemperatur ist ein Erweichen der Oberfläche nicht möglich, es setzt kein Fließen und damit keine Glättung ein.

Der optimale Temperaturbereich beginnt bei 1900 °C also deutlich oberhalb vom Erweichungspunkt und erstreckt sich bis 2100 °C, einer Temperatur, bei der der Materialabtrag vernachlässigbar gering ist. Die Temperatur wird von zwei Parametern wesentlich beeinflusst, das haben die statistischen Untersuchungen in 5.4 gezeigt. Es handelt sich dabei um die Laserleistung P und um die Vorschubgeschwindigkeit v_f . P ist vom Laser abhängig und vergleichsweise genau einstellbar. Da für ein Erweichen der Oberfläche die Leistung für eine gewisse Zeit t einwirken muss, ist eigentlich t die zweite wichtige Größe. Sie setzt sich aus v_f und v_s (Scangeschwindigkeit) zusammen, wobei der wesentlich größere Einfluss von v_f herrührt. Der Strahldurchmesser d_f bedingt die Intensität der Strahlung auf der Oberfläche und wirkt dadurch auch auf die Temperatur. Weiterhin ist d_f eine Einflussgröße für den Materialabtrag und den Formerhalt der Oberfläche (und ihrer Makrostruktur). Die Unterlage der Proben sowie Luftbewegungen (z. B. durch Absaugung) haben geringen Einfluss. Das Erweichen der Oberfläche – als Grundvoraussetzung der Laserstrahlpolitur – wird auch durch innere Faktoren des Prozesses bzw. des Materials bestimmt. Ihre Vielzahl und Komplexität ist mitverantwortlich dafür, dass die Simulation des Laserstrahlpolierens so überaus schwierig ist. Darüber hinaus handelt es sich

vernachlässigbar gering werden. Der Absorptionsgrad α_{abs} bzw. der Grad der Energieeinkopplung bestimmt, welcher Anteil von P zum Erweichen der Oberfläche beiträgt. Die Viskosität, die mit steigender Temperatur abnimmt und so ein Fließen des Quarzglas an der Oberfläche und damit die Glättung ermöglicht, muss kleiner 10^5 dPa's (vgl. Abb. 3-20 auf S. 60) sein. Aber auch dann kann nur eine Glättung durch Fließen erreicht werden, wenn ein entsprechend großer Bereich zähfließend ist. Die schnelle Scanbewegung (800 mm/s), überlagert mit der Vorschubbewegung, führt zu einem Überlagerungsgrad der Scanlinien $> 99\%$ und damit zum quasisi-multanen Erweichen der Oberfläche. Es gibt folglich keine sichtbaren Übergänge im polierten Bereich der Proben. Ist die Oberfläche zähflüssig, trägt auch die Oberflächenspannung zur Glättung bei. Selbst bei hohen Temperaturen ist die Fließneigung des Quarzglas jedoch gering, deshalb bleibt aber die Form der Oberfläche bzw. die Geometrie eines Bauteiles bei der LSP erhalten. Der Grad der Vorbearbeitung und die Reinheit der Prozessumgebung beeinflussen ebenso die erreichbare Oberflächenqualität (vgl. 6.3.2).

Bei einer Ausgangsrauheit $R_a < 0,4\ \mu\text{m}$ kann durch die LSP eine Rauheit von $6\ \text{nm} < R_a < 10\ \text{nm}$ mit einem Materialabtrag $< 1\ \text{mg}$ erreicht werden.

Das Polieren einer Fläche von $25\ \text{cm}^2$ erfordert eine Scanbreite von 60 mm, wodurch die konstante Temperaturverteilung in der Polierlinie (entlang der Scanrichtung) nicht mehr vollständig gegeben ist. Die Anpassung für v_f und P an Probengrößen abweichend von 25 mm Kantenlänge erfolgt über die Temperatur. (Der Bereich von 1900...2100 °C muss erreicht werden.) Um die Anzahl der Versuche zur Anpassung der Parameter zu reduzieren, kann folgende Überschlagsrechnung angewendet werden:

$$\frac{P_1}{v_{f1} \cdot x_1} = \frac{P_2}{v_{f2} \cdot x_2} \quad \text{Gl. 7-1}$$

Dieses einfache Verhältnis besagt, dass die Vergrößerung der Kantenlänge x durch eine Erhöhung der Leistung oder eine Ver-

ringerung der Vorschubgeschwindigkeit ausgeglichen werden kann. Es bietet weiterhin die Möglichkeit, die Vorschubgeschwindigkeit auch dann noch anzupassen, wenn die Maximalleistung des Lasers erreicht ist.

7.2 Vergleich des Laserstrahlpolierens mit anderen Polierverfahren

Die Laserstrahlpolitur ist aufgrund ihrer Wirkungsweise nahezu einzigartig und nur indirekt mit anderen Polierverfahren vergleichbar. Sie ist hauptsächlich durch die Temperatur bestimmt, kann auf einen sehr kleinen Wirkbereich beschränkt werden und erfolgt berührungs- bzw. kraftlos. Sie ähnelt damit der Ionenstrahlbearbeitung, welche allerdings wegen des enormen Zeit- und Kostenaufwandes nur für die Korrekturpolitur von Hochleistungsoptiken eingesetzt wird. Auch sie erfolgt, indem ein Strahl (in diesem Falle aus beschleunigten Inertgas-Ionen) scannend über die zu polierende Oberfläche geführt wird. Es handelt sich dabei um ein abtragendes Verfahren mit dem Rauheiten bis 0,1 nm erzeugt werden. [Blie08] Im Prinzip ist jedes bekannte Polierverfahren für Glas mit einem Materialabtrag verbunden. Auch bei der Laserstrahlpolitur kann er nicht vollständig verhindert werden. Allerdings ist es, wie schon gezeigt, möglich ihn zu minimieren, bis er vernachlässigbar gering wird. Die klassische mechanische Politur mit herkömmlichen Werkzeugen und Poliermitteln wurde in ihrer Wirkungsweise und in den Einschränkungen hinsichtlich Bearbeitungszeit und polierbarer Geometrie schon beschrieben. Es wurde auch gezeigt, dass sie sich für Flächen gut eignet, die groß sind und keine Freiformgeometrie oder kleine Strukturen besitzen. Für die Politur solcher Flächen kommen Subaperturwerkzeuge zum Einsatz. Sie haben eine Form, die von der Form der zu polierende Fläche abweicht, und eine geringe Größe. Ihr Einsatz erhöht jedoch die Polierzeit um den Faktor 10 bis 100. Da sie, genau wie das mechanische Polieren mittels vollflächig-

gen Werkzeugen, in einem Mehrstufenprozess durchgeführt werden, können sie die Formgenauigkeit verbessern. Diese Möglichkeit bietet das Laserstrahlpolieren nicht. Da die Materialerweichung nur in einer ganz geringen Tiefe der Oberfläche wirkt, kann nur die kurzwellige Rauheit einer Oberfläche, nicht aber die langwellige Welligkeit oder der noch größere Formfehler beseitigt werden.

Ein weiterer Unterschied der Laserstrahlpolitur zu den anderen Verfahren ist die Erzeugung nicht unerheblicher Materialspannungen in den laserpolierten Bauteilen. Wie stark sie sich ausbilden, ist beeinflussbar und sie können sehr gut durch einen nachgeschalteten Kühlprozess abgebaut werden aber sie sind während der Politur und auch danach vorhanden.

Neben der bekannten Laserstrahlpolitur von metallischen Oberflächen wird auch die Laserstrahlpolitur von Quarzglas in anderer Verfahrensweise durchgeführt. So beschreibt [Rich10] die Politur von ebenen Quarzglaskörpern (Kantenlänge 20 mm) mittels CO₂-Laser und vergrößertem Geräteaufwand, da die Proben zur Politur vorgeheizt werden müssen und sich in einer Flow-Box befinden. Dass es wichtig ist, die Proben vor und während der LSP vor Fremdpartikeln zu schützen, wurde in 6.3.2 bereits empfohlen. Die Oberflächenqualität, die erreicht wird, ist mit der in der vorliegenden Arbeit erzielten vergleichbar. Sie besitzt einen arithmetischen Mittenrauwert von ca. 3 nm, wobei eine Qualität der Vorbearbeitung von $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ gefordert wird. Allerdings gibt es keine Aussage über ggf. erhöhten Materialabtrag und der Messbereich für die Rauheitsmessung umfasst nur 1 mm. In der vorliegenden Arbeit beträgt er stets 15 mm. Auch in der Untersuchung von [Rich10] ist es nicht möglich, die Welligkeit bzw. den Formfehler einer Oberfläche zu verbessern. Als Anwendungsgebiet sieht diese Untersuchung Massen- und Hochleistungsoptik, wobei für letztere die erreichte Oberflächenrauheit nicht ausreicht.

8 Ausgewählte Applikationen

8.1 Prozesskette Linsenarray

Mit einem galvanisch belegten Kugelschleifstift Durchmesser 20 mm (Körnung: D64 Vorschleifen, D30 Feinschleifen) wird in einen Quarzglaskörper ein Array aus 3 x 3 konkaven Linsen geschliffen. Die Tiefe dieser Elemente beträgt 0,5 mm, wodurch sich ein Durchmesser von 6,5 mm ergibt. Die Kugel wird dabei unter 90° zur Werkzeugachse abgebildet, um eine Schnittgeschwindigkeit gleich Null zu vermeiden. Der Schleifprozess findet an der herkömmlichen 4-Achs-CNC-Maschine – ohne Ultraschallunterstützung – statt. Dieses und das Fehlen einer zweiten Bewegung, die zum Eingriff neuer (scharfer) Schleifkörner beitragen würde, führen zu einer relativ rauen Oberfläche mit einem Ra von 2,4 µm. In der Abb. 8-2 sind Ergebnisse der 3D-Tastschnittmessung einer geschliffenen und anschließend laserstrahlpolierten Linse des Arrays zu sehen. Weitere Pa-

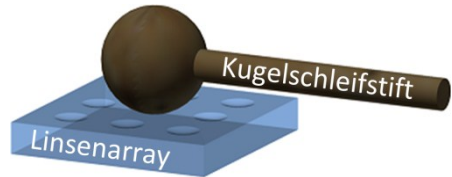


Abb. 8-1: Linsenarray und Scheifwerkzeug (Achse unter 180° zur Oberfläche)

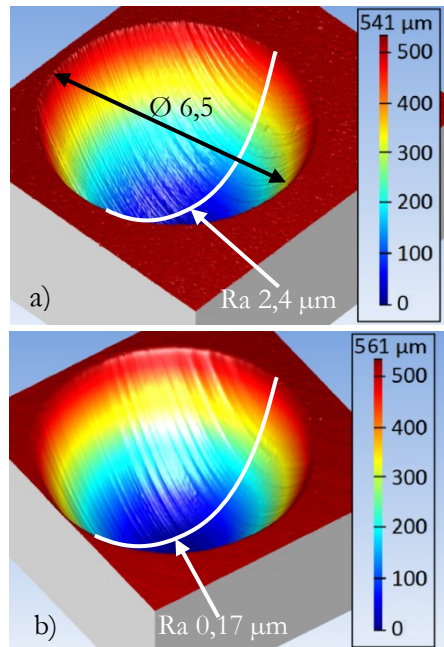


Abb. 8-2: Linse aus Linsenarray

a) nach dem Schleifen;

b) nach der Laserstrahlpolitur

Weitere Pa-

parameter sind: $n_g = 12000 \text{ min}^{-1}$ und $v_f = 1 \text{ mm/min}$. Die LSP erfolgte am SM1500P mit Galvo-Scanner und mit den Parametern $P = 950 \text{ W}$; $v_f = 40 \text{ mm/s}$ und $v_s = 800 \text{ mm/s}$. Die höhere Leistung und geringere Vorschubgeschwindigkeit (gegenüber den möglichen Werten aus der Prozessoptimierung in 5.4.5) sind in der Größe des Arrays, welches eine Kantenlänge von 40 mm hat, begründet (vgl. 6.5.4 und 7.1). Die große Ausgangsrauheit verhindert ein gutes Polierergebnis. Es wird eine transparente Oberfläche erreicht und die Rauheit um das 14-fache reduziert, jedoch sind die Schleifriefen noch deutlich erkennbar. Die Kante der Linse wird zwar leicht abgerundet, insgesamt bleibt die Form aber sehr gut erhalten. Ein Ergebnis, welches zeigt, dass die Laserstrahlpolitur strukturerhaltend wirkt.

8.2 Prozesskette Spritzgusswerkzeug-Formeinsatz

8.2.1 Test mit Probegeometrie aus Schleifuntersuchungen

In Abschnitt 5.3.4 wurde bereits die Optimierung des Schleifprozesses für die 2½D-Konturen erläutert. Die dort untersuchte Kontur enthält unterschiedliche Formen und Bearbeitungsrichtungen, die zur Optimierung des Schleifprozesses notwendig sind und dient als Test für die 2½D-LSP an der SM1500P Laseranlage. Eine Probe der Größe $40 \times 40 \times 6 \text{ mm}^3$ wird mittels 4-Achs-CNC-Schleifen vorbearbeitet. Aus den Optimierungsuntersuchungen in Abschnitt 5.3.4 ergeben sich die Bearbeitungsparameter zu:


- Vorschubgeschwindigkeit • Drehzahl 12000 min^{-1}
 30 mm/min • Schnittgeschwindigkeit
- Zustellung 0,1 mm 2,51 m/s.

Die Bearbeitungszeit beträgt 2,5 h und es werden die Rauheitswerte ($R_{q_{vor}}$) in Tabelle 8-1 erreicht.

Mit der Laserstrahlpolitur werden nun erstmals die in der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse auf diese kompliziertere Oberflä-

chengeometrie angewendet. Da außerhalb der Fokuslänge (Abstand der obersten Ebene vom Fokus +100 mm) gearbeitet wird, ist ein Unterschied der erreichbaren Oberflächenqualität auf den einzelnen Ebenen der Geometrie zu erwarten. Die Größe der Probe und die Tiefe der Geometrie verlangt erneut eine Anpassung der Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit ($P = 1000 \text{ W}$; $v_f = 20 \text{ mm/s}$).

Tabelle 8-1: Rauheitswerte des Formeinsatzes nach Schleifen und LSP

	Ebene	Rq_{vor} [nm]	Rq_{nach} [nm]
	1	1033*	7
	2	305	15
	3	503	18
* Ebene wurde nicht geschliffen (Oberfläche des Ausgangsmaterials)			

In Tabelle 8-1 sind die nach der LSP erreichten Rauheitswerte (Rq_{nach}) den Ausgangswerten nach dem Schleifen (Rq_{vor}) gegenüber gestellt. Auf der Ebene 1 wird die höchste Oberflächenqualität erreicht. Mit zunehmendem Strahldurchmesser (bis +0,23 mm auf Ebene 3) nimmt die Intensität und damit der Energieeintrag ab, wodurch die Rauheitswerte leicht ansteigen. An dieser Stelle zeigt sich, dass eine Bearbeitung mit einem Parallelstrahl oder einem Strahl mit großer Fokuslänge dem Polieren außerhalb des Strahlfokus vorzuziehen ist, wenn das Laserstrahlpolieren auf die Bearbeitung von 2½D-Oberflächen angewendet werden soll (vgl. 8.3.2).

8.2.2 Formeinsatz zum Spritzgießen von MID aus CNT-haltigen Polymerblends

Molded Interconnect Devices (MID) sind dreidimensionale spritzgegossene Bauelemente, welche mit Leiterbahnen versehen werden. Im vorliegenden Fall handelt es sich um ein Forschungsprojekt, bei dem aus einem Polycarbonat-Polypropylen-Blend mit 3 % Kohlenstoffnanoröhren (carbon nanotube = CNT) Spritzgussteile hergestellt werden, auf denen anschließend mittels Laserstrahlung elektrisch leitende Bahnen erzeugt werden. [FH]e10]

Im Projekt werden Probeteile unterschiedlicher Dicke untersucht. Aus diesem Grund erfolgt die Konstruktion und Herstellung eines stufenartigen Bauteiles. In Abb. 8-3 ist eine Zeichnung dieses Teiles zu sehen.

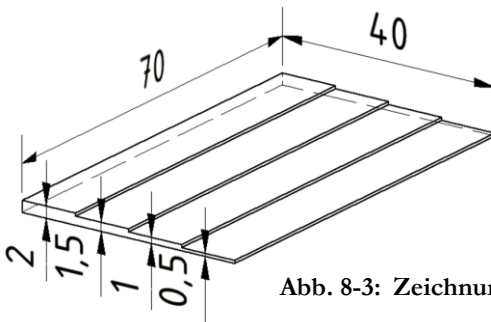


Abb. 8-3: Zeichnung des Stufenteils

Abb. 8-4 zeigt die detaillierte Prozesskette zur Herstellung des Formeinsatzes. Die Bearbeitungszeit der Innenkontur wird stark von der konstruktiven Anforderung an den Eckenradius (0,5 mm) der einzelnen Stufen beeinflusst. Der erste Fertigungsschritt zum Schleifen der Stufen mit einem Schleifwerkzeug des Durchmessers 4 mm dauert 45 min. Das Schleifen der Ecken mit einem Werkzeugdurchmesser von 1 mm dauert 75 min.

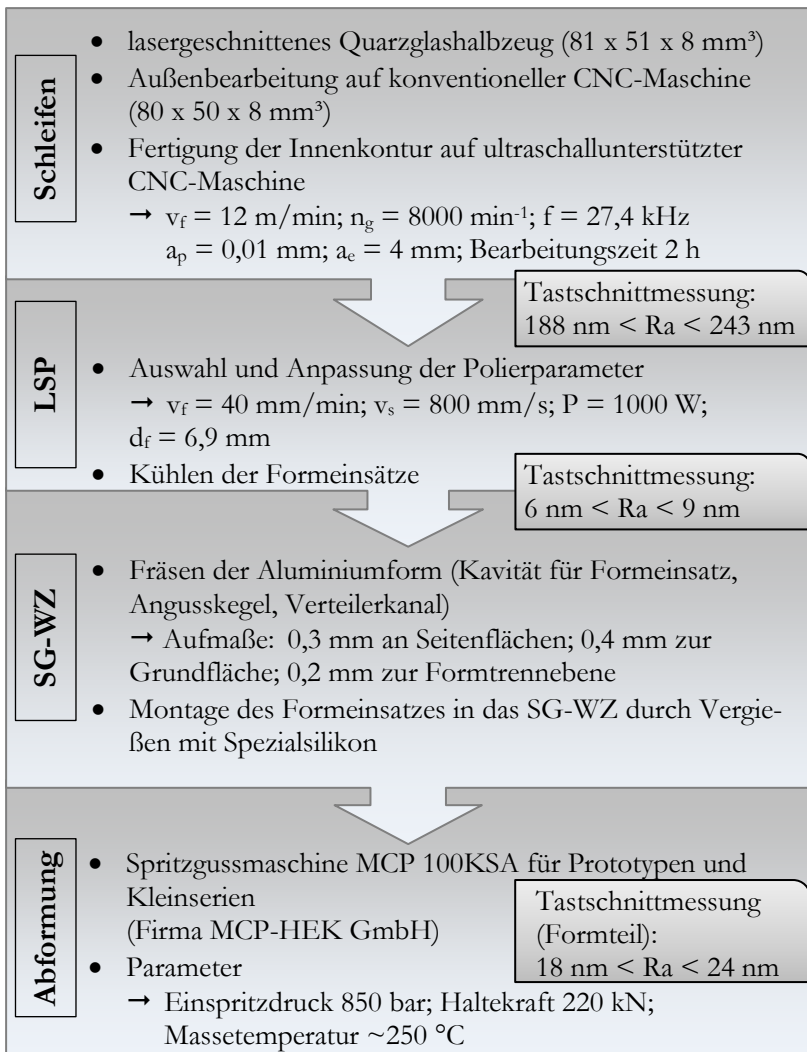


Abb. 8-4: Prozesskette zur Fertigung eines Formeinsatzes aus Quarzglas für ein Spritzgusswerkzeug (SG-WZ) mit anschließendem Spritzgießen

Für die LSP müssen Vorschub und Laserleistung erneut auf die Kantenlänge von 50 mm angepasst werden. Der Strahldurchmes-

ser von 6,9 mm bezieht sich auf die vertikale Mitte der Stufenkavität. Damit beträgt er 6,8 mm auf der höchsten und 7 mm auf der tiefsten Stufe. Ein Einfluss dieser Durchmesseränderung auf die erreichten Rauheitswerte kann nicht festgestellt werden. Es wurden insgesamt zwei Formeinsätze mit je 4 Stufen hergestellt. Nach der LSP variiert R_a innerhalb der Stufen auf dem einen um 3 nm und auf dem anderen nur um 1 nm.

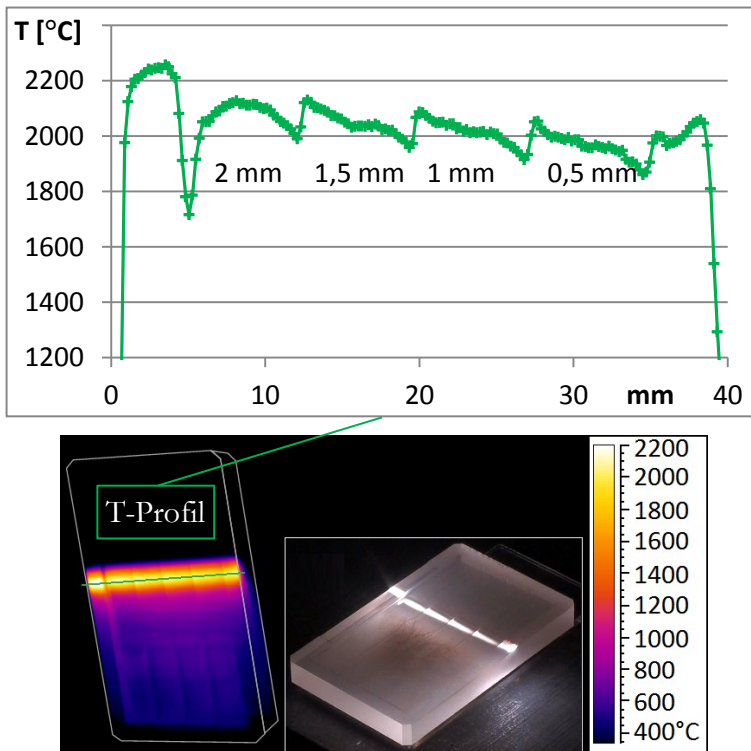


Abb. 8-5: Thermografie- und Realbild des Werkzeugformeinsatzes während der Laserstrahlpolitur

Die Aufnahme der Wärmebildkamera und das Foto in Abb. 8-5 zeigen den Werkzeugformeinsatz während der Politur. Im zugehörigen Temperaturprofil (entlang der grünen Linie im Wärmebild) sind die einzelnen Stufen genau zu erkennen. Es wird

deutlich, dass sich die mittlere Temperatur zwischen den Stufen nicht wesentlich unterscheidet. Sie liegt im angestrebten Bereich von 1900 bis 2100 °C. Der Temperatureinbruch an der 2 mm-Stufe markiert die größte Seitenfläche, die senkrecht zum Laserstrahl steht und damit nicht so stark erwärmt wird. An den Stufenvorderkanten ist die Temperatur höher als an den hinteren Kanten. Die Maximaltemperatur von 2250 °C herrscht auf der höchsten Fläche des Bauteils, die zudem kurz vor der Aufnahme vom Laserstrahl überstrichen wurde. Daher rührt auch die etwas höhere Temperatur auf der daneben liegenden Stufe.

Zur Verbindung zwischen Quarzglas und Aluminium im Spritzgusswerkzeug wurden umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt, wobei von Beginn an die Klebung mittels Silikon favorisiert wurde. Der Vorteil des Silikons liegt darin, dass es die verschieden große Wärmeausdehnung der Materialien, die Verformung des Aluminiums und den Druck des Spritzgießens (Formschluss und Einspritzen) ausgleichen kann. Dafür muss das Material bestimmte Anforderungen erfüllen. Die wichtigste ist die Temperaturbeständigkeit. Sie beträgt für das verwendete Silikon 260 °C. Weiterhin sind eine gute Vernetzung zwischen Quarzglas und Metall sowie eine hohe Elastizität erwünscht. Die eingesetzte Silikonvergussmasse erfüllt beide Anforderungen.

In Abb. 8-6 sind die Spritzgussform aus Aluminium mit dem Formeinsatz aus Quarzglas und ein abgeformtes Bauteil aus dem Material „ppmid 100 F1M0“ zu sehen. Die durchgeführten Abformversuche zeigen, dass die Form bei entsprechender Form- und Massetemperatur leicht gefüllt werden kann. Die Kunststoffteile haften zu keiner Zeit am Quarzglas an, sondern liegen beim Öffnen der Form immer auf der Gegenseite. Eine Beeinflussung der Quarzglasoberfläche konnte nicht festgestellt werden. Die erreichbare Oberflächenrauheit auf den Kunststoffteilen (Abb. 8-3) hängt stark von der Massetemperatur und vom Fließverhalten der Masse ab.

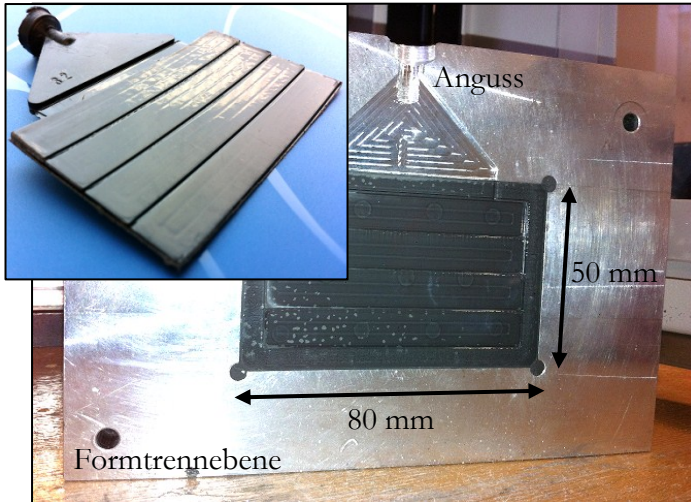


Abb. 8-6: Spritzgusswerkzeug (SG-WZ) mit Quarzglasformeinsatz und abgeformtes Stufenteil

Es kann mit dieser Prozesskette der Nachweis der Herstellung und Anwendung eines laserstrahlpolierten Quarzglasformeinsatzes für das Spritzgießen erbracht werden. Die Prozesskette wird detailliert im Forschungsprojekt „Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zum Laserstrahlpolieren von strukturierten Quarzglasoberflächen für den Einsatz in Spritzgussformen“ [Hech11] vorgestellt.

8.3 LSP mit neu entwickeltem Piezoscanner

8.3.1 Untersuchungen auf ebenen Oberflächen

Die vorangegangenen Applikationsbeispiele zeigen, dass die Konstanz des Laserstrahldurchmessers ein entscheidender Faktor für das Erreichen einer homogenen Oberflächenqualität durch das Laserstrahlpolieren ist. Der in Kapitel 4.3 vorgestellte neu entwickelte Piezo-Scanner soll diese Konstanz gewährleisten. Im aktuellen Aufbau ist er mit einem Fokussierspiegel mit dem

Radius 2000 mm ($f_b = 1000$ mm) ausgestattet. Durch die zwei Umlenkspiegel im Strahlverlauf beträgt der Strahldurchmesser des DC020 an der Position des Scanners 16,8 mm. Es ergeben sich ein Fokusbereich von 6,8 mm und eine RAYLEIGH-Länge von 178 mm. Der Strahldurchmesser variiert damit innerhalb der Fokusbereich ($2z_R$) auf einer Höhe von 200 mm nur um +0,1 mm. Damit können 2½D-Bauteile poliert werden, deren Ebenen Höhenunterschiede bis 200 mm aufweisen.

Zum Nachweis der generellen Funktionalität des Piezo-Scanners werden zunächst Versuche mit unterschiedlichen Parametern auf den bisher verwendeten ebenen Proben der Kantenlänge 25 mm durchgeführt. Die Parameterauswahl erfolgte anhand der bisherigen Ergebnisse. Eine Anpassung und ein gewisser Testumfang sind dennoch notwendig, da es sich um ein anderes Scankonzept handelt.

Aufgrund der Ansteuerung und der zugehörigen Software sowie der Bewegung über zwei Scannerachsen ergeben sich folgende Parameter:

Tabelle 8-2: Parameter des Piezo-Scanners und deren Überführung in bekannte LSP-Parameter

Parameter des Piezo-Scanners		Überführung in bekannte Parameter	
Parameter	Formelzeichen [Einheit]	Berechnung aus	Formelzeichen [Einheit]
Linienanzahl	anz	x_f ; anz ; t_w	v_f [mm/min]
Vorschubweg	x_f [mm]	y_f ; x_f ; anz ; t_w	v_s [mm/s]
Scanweg	y_s [mm]		
Wartezeit der Piezos	t_w [s]		

Bei der Betrachtung der Parameter in Tabelle 8-2 fällt sofort auf, dass v_f und v_s von gleichen Parametern abhängen und damit

auch voneinander. Es werden Rechenalgorithmen verwendet, um bei Vorgabe eines Parameters den anderen entsprechend anzupassen. Prinzipiell gilt, je größer die Linienanzahl und je kürzer der Vorschubweg, umso geringer der Linienabstand und umso gleichmäßiger wird die Oberfläche erwärmt. Die Laserleistung kann weiterhin an der Lasersteuerung genau vorgegeben werden. Die Auswahl der geeigneten Parameter erfolgte vor allem anhand der sofortigen Auswertung der Aufzeichnungen der Wärmebildkamera.

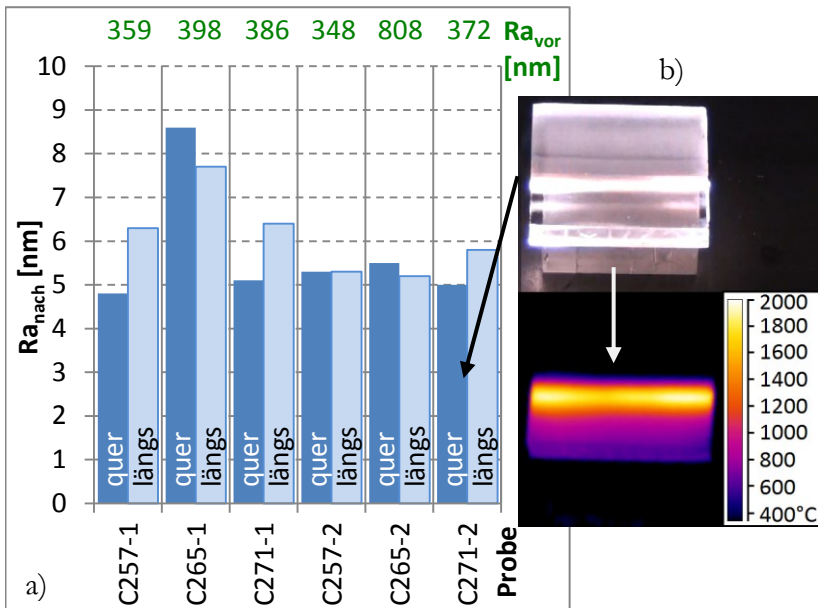


Abb. 8-7: a) Rauheitswerte der Proben vor und nach der Politur mittels Piezo-Scanner

b) Real- und Thermografiebild der Probe C271-2 während der LSP mittels Piezo-Scanner

Die Abb. 8-7 zeigt ein Diagramm mit einer Auswahl von 6 Proben der Gruppe C. Die Ausgangsrauheit liegt an der oberen Grenze der Gruppe und wird auf Probe C265-2 sogar deutlich überschritten. Dennoch kann auf allen Proben ein Ra -Wert < 9 nm erreicht

werden. Dabei ist kein systematischer Unterschied zwischen der Rauheit längs und quer zur Vorschubrichtung zu erkennen. Die besten Ergebnisse (Proben C257-2; C265-2; C271-2) werden mit $v_f = 22 \text{ mm/min}$, $v_s = 1100 \text{ mm/s}$ und $P = 600; 565; 530 \text{ W}$ erreicht. Das Wiegen dieser Proben zeigt, dass die LSP mit dem Piezo-Scanner noch nicht abtragfrei erfolgt. Die abnehmende Leistung führt aber zu einer Verringerung des Abtrages von 60 über 48 auf 27 mg pro Probe. Das Foto in Abb. 8-7 b) lässt bereits vermuten, dass die Temperaturverteilung in Scanrichtung nicht vollständig homogen ist. Dies wird in der thermografischen Aufnahme bestätigt. In der Nähe der Probenkanten und somit in der Nähe der Umkehrpunkte (die außerhalb dieser Kanten liegen) führen die Beschleunigung und das Abbremsen des Kippspiegels zu einer erhöhten Temperatur auf der Probenoberfläche. Insgesamt gleicht die „Polierlinie“ aber durchaus der des herkömmlichen Galvo-Scanners. In der Mitte der Line wird mit $1900 \dots 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ die angestrebte Poliertemperatur erreicht.

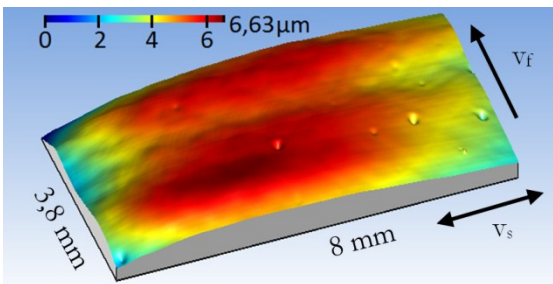


Abb. 8-8: 3D-Tastschnittmessung einer mech. polierten und anschließend laserpolierten Probe

Abb. 8-8 zeigt zum Vergleich die laserpolierte Oberfläche (Ausschnitt aus Probenmitte) einer zuvor mechanisch polierten Probe. Es sind die typischen runden Vertiefungen zu

sehen, die auf Verunreinigungen oder Poliermittelrückstände (trotz gründlicher Reinigung) schließen lassen. Weiterhin erzeugt die LSP auf dieser Probe – bedingt durch die inhomogene Temperaturverteilung – eine sichtbare Wellenstruktur. Die daraufhin durchgeführte Strahlanalyse hat ergeben, dass das Strahlprofil des Piezo-Scanners nicht radialsymmetrisch sondern elliptisch ist. Die

Defizite (diskontinuierliche Scanbewegung und elliptisches Strahlprofil) müssen in der zukünftigen Weiterentwicklung der Scanner-Steuerung beseitigt werden.

8.3.2 Laserstrahlpolitur von Prismen

Die zu polierenden Prismen sind regelmäßig dreiseitig, haben eine Grundfläche von $28 \times 9 \text{ mm}^2$ und eine Höhe von 14 mm. Die schrägen Flächen sind geläppt und weisen eine Ausgangsrauheit R_a von ca. $0,36 \mu\text{m}$ auf. Sie liegen deutlich innerhalb der Fokuslänge des Piezo-Scanners und sollten nach der LSP ein gleichmäßiges Polierergebnis zeigen.

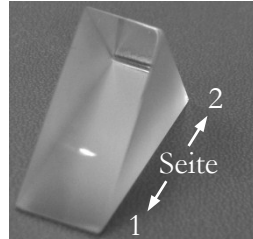


Abb. 8-9: Prisma P11

Es wurde mit folgenden Parametern poliert:

$v_f = 22 \text{ mm/min}$; $v_s = 1100 \text{ mm/s}$; $P = 565 \text{ W}$.

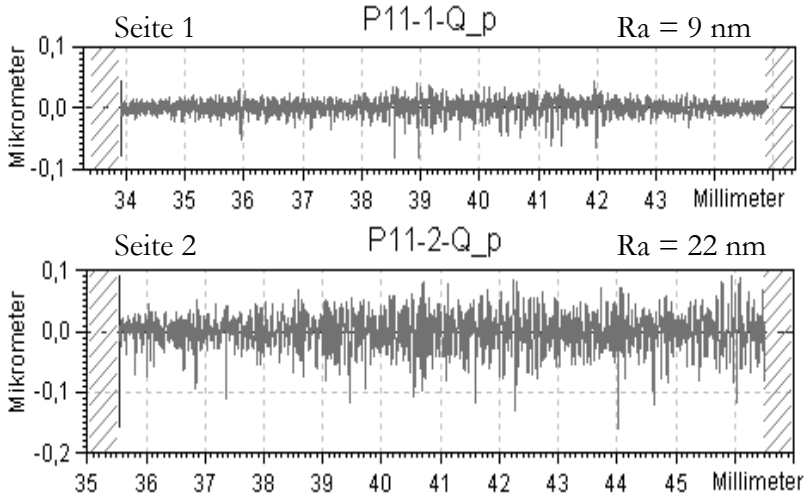


Abb. 8-10: Gefiltertes Rauheitsprofil des laserstrahlpolierten Prismas P11

Die Abb. 8-10 zeigt die Rauheitsprofile des Prismas P11 (aus Abb. 8-9). Sie haben einen konstanten Verlauf von oben nach

unten auf den Seitenflächen. Eine Höhenabhängigkeit ist nicht zu erkennen. Der Unterschied zwischen Seite 1 und 2 liegt im zuvor schon beschriebenen Fehler der Piezosteuerung begründet. Der Materialabtrag bei der Politur der Prismen beträgt nur 1 mg. Es wird zwar die gleiche Laserleistung auf die Oberfläche gebracht wie bei der Politur der ebenen Flächen, aber ein Teil der Strahlung wird auf Grund des nicht mehr senkrechten Einfalls reflektiert und trägt somit nicht zum Erweichen der Oberfläche bzw. zum Verdampfen des Quarzglases bei.

9 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zum Thema „Entwicklung eines Laserstrahlpolierverfahrens für Quarzglasoberflächen“ zeigen, dass es möglich ist, mittels CO₂-Laserstrahlung ebene und strukturierte Oberflächen von Quarzglaskörpern formerhaltend zu Glätten. Es ergeben sich außerdem neue Einsatzgebiete für Quarzglas, indem das bekannte Verfahren der Bearbeitung von metallischen Oberflächen mittels Laserstrahlung, auf das grundverschiedene Material Glas, angewendet wird. Die Laserstrahlung wirkt dabei unabhängig von der Geometrie der zu polierenden Oberfläche in der Art eines schnellen Subaperturwerkzeuges.

Das Ziel der Laserstrahlpolitur ist die gleichmäßige Glättung eines Rauheitsprofils in kürzester Zeit. Am Beginn der Untersuchungen stand die Erarbeitung und Überprüfung des Funktionsprinzips der Laserstrahlpolitur unter Einbeziehung der benötigten Anlagentechnik und bekannten Wechselwirkungsmechanismen. Der materialbedingt hohe Absorptionsgrad der CO₂-Laserstrahlung im Quarzglas führt bei entsprechend angepasster Energiedichte zum Erweichen der Oberfläche. Durch Materialerwärmung und die damit verbundene Herabsetzung der Viskosität fließt das Quarzglas in einer dünnen Oberflächenschicht. Unterstützt durch die Oberflächenspannung werden so Profilspitzen eingeebnet und -täler aufgefüllt. Ist die Energiedichte zu hoch, führt das u. a. zum Materialabtrag. Ist sie dagegen zu niedrig findet keine Glättung statt. Daher wurden zu Beginn der Untersuchungen ein optimiertes Scankonzept und ein dazu angepasster Strahldurchmesser festgelegt. Die Anwendung eines Scanners vereinfacht die gleichmäßige und großflächige Einbringung der Laserenergie. In den Untersuchungen wurde vorwiegend ein handelsüblicher Scanner mit galvanometrisch angetriebenen Spiegeln verwendet. Durch die hohe Scangeschwindigkeit von 800 mm/s wird auf einer Länge von 37 mm eine „Polierlinie“ erzeugt, die durch eine gleichzeitige Überlage-

rung mit einer Vorschubbewegung das gewünschte gleichmäßige Erweichen der Quarzglasoberfläche ermöglicht.

Simulationen haben gezeigt, wie sich die Temperatur und die Materialspannungen während der Laserstrahlpolitur ebener Flächen entwickeln. Die Temperatur ist die wichtigste Größe des Prozesses und muss zur Verfahrensoptimierung und -kontrolle zu jeder Zeit der Untersuchungen und auch in der späteren Anwendung des Verfahrens beeinflusst und überwacht werden. Daher kommt der Temperaturerfassung besondere Bedeutung zu. Die größte Übersichtlichkeit und die besten Auswertmöglichkeiten bietet dabei die flächige Temperaturerfassung mittels Thermografie. Zur laufenden Prozesskontrolle ist die punkt- bzw. linienförmige Messung mittels Pyrometer ausreichend. Eine experimentelle Erprobung und Gegenüberstellung beider Verfahren und Geräte innerhalb der Arbeit bestätigt das. Aus den Ergebnissen wird in den Untersuchungen für eine erfolgreiche Laserstrahlpolitur ($6 \text{ nm} < \text{Ra} < 10 \text{ nm}$) der Temperaturbereich von $1900 \dots 2100 \text{ }^\circ\text{C}$ festgelegt. Innerhalb dieses Bereiches handelt es sich gewissermaßen um eine abtragfreie Politur. Bei Proben einer Masse von ca. 6 g beträgt der untersuchte Materialabtrag $< 1 \text{ mg}$. Die in den grundlegenden Untersuchungen verwendeten Proben hatten eine Kantenlänge von 25 mm. Zur Vorbereitung der Experimente und zur Fertigung der Proben wurden die Verfahren Flach- und Pendelschleifen, Schleifen an CNC-Maschinen mit und ohne Ultraschallunterstützung sowie Läppen untersucht. Dabei war es wichtig zu ermitteln, welche Rauheiten mit den jeweiligen Verfahren erreicht werden können und gleichzeitig definierte Ausgangsbedingungen auf den Proben für die Laserstrahlpolitur zu schaffen. Es hat sich gezeigt, dass Quarzglasoberflächen mit einem Ra-Wert im Bereich von 0,1 bis $0,4 \text{ }\mu\text{m}$ entsprechend der Anforderungen laserpoliert werden können. Diese Voraussetzung wird auf ebenen Oberflächen durch Läppen

und auf 2½D-strukturierten Körpern durch das ultraschallunterstützte Schleifen an einer CNC-Schleifmaschine sehr gut erreicht. Sowohl die Probenvorbereitung, als auch die Experimente zur Laserstrahlpolitur wurden unter Anwendung statistischer Methoden durchgeführt und ausgewertet. So können mit reduziertem Versuchsaufwand Parameter ausgewählt und ihr Einfluss auf die Prozess- und Zielgrößen ermittelt werden. Auch diese Methoden zeigen, dass für die Laserstrahlpolitur die Leistung und ihre Einwirkdauer von größter Bedeutung sind.

Aus den Untersuchungsergebnissen wurden Nomogramme erstellt, welche den Einfluss der Kombination von Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit auf die Oberflächenrauheit, den Materialabtrag und die Poliertemperatur widerspiegeln. Sie ermöglichen eine gezieltere Parameterauswahl und schränken somit den erforderlichen Versuchsumfang ein.

Die Untersuchungen zeigen, dass die erreichbare Oberflächenqualität nicht nur von den Prozessparametern und der Ausgangsrauheit abhängt sondern auch von der Reinheit der vorbearbeiteten Oberflächen und der Prozessumgebung. Kleinste Partikel von Fremdstoffen, führen zu Oberflächendefekten und müssen zukünftig aus der Wechselwirkungszone Laserstrahl und erweichte Oberfläche ferngehalten werden. Das ist ein Ergebnis der umfassenden Untersuchungen der laserstrahlpolierten Oberflächen. Sie enthalten weiterhin Messungen am Tastschnittmessgerät (2- und 3D), AFM-, REM- und EDX-Analysen sowie Härte- und Biegebruchfestigkeitsuntersuchungen. Diese zeigen unter anderem, dass sich die Laserstrahlpolitur positiv auf die untersuchten mechanischen Eigenschaften auswirkt. Weiterhin wird deutlich, dass die Form der Oberflächen durch die Einwirkung der Laserstrahlung nicht verändert wird. Es ist nicht möglich, die Welligkeit einer Oberfläche durch die Laserstrahlpolitur positiv zu beeinflussen. Die LSP wirkt damit formerhaltend. Gleichzeitig kann nachgewiesen werden, dass der Polierprozess

selbst keine Struktur erzeugt. Die Untersuchung der Materialspannungen verdeutlicht, dass sie mit einem geeigneten Kühlprozess abgebaut werden können bzw. müssen. Mit bestimmten Prozessparametern und bei kleinen, dünnen Körpern können aber auch ohne Nachbehandlung vernachlässigbar geringe Spannungen erreicht werden.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Untersuchungen wurde ein Piezo-Scanner entwickelt, gefertigt und erfolgreich in den Testbetrieb überführt, der die Anwendung der Laserstrahlpolitur von ebenen Flächen auf Oberflächen mit 2½D-Konturen ohne die z-Position nachführen zu müssen, erweitert.

Die vorgestellten Anwendungsbeispiele demonstrieren die erfolgreiche Fertigung und Anwendung eines Werkzeugformeinsatzes aus Quarzglas für das Spritzgießen eines CNT-haltigen Kunststoffes. Der Formeinsatz ist in der Folge eines erfolgreich durchgeführten industrienahen Forschungsprojektes entstanden und ermöglicht die Herstellung von Versuchskomponenten für ein neues Projekt.

Mit dem entwickelten Laserstrahlpolierverfahren können Quarzglasoberflächen mit einer Polierrate von 4,8 s/cm² bearbeitet werden. Die durchgeführte mechanische Vergleichspolitur benötigt dagegen 228 s/cm².

Das Laserstrahlpolieren ist geeignet, um auf Quarzglasoberflächen geforderte Rauheitswerte zu erzeugen. Die Einsatzgebiete liegen insbesondere beim Polieren von 2D- und 2½D-Bauteilen, Werkzeugformeinsatzes für die Kunststoffverarbeitung und – mit entsprechend guter Vorbearbeitung – auch in Teilbereichen optischer Komponenten.

10 Quellenverzeichnis

10.1 Literatur

- [ACCS09] ACC Silicones Ltd. (2009). PV2553 - Thermally Conductive Silicone Encapsulant. *Technical Data Sheet*. Somerset UK.
- [Auto04] Autorenkollektiv. (2004). *Pyrometerhandbuch*. Frankfurt am Main: Firmenschrift der IMPAC Infrared GmbH.
- [Baue91] Bauer, H. (1991). *Lasertechnik*. Würzburg: Vogel-Verlag.
- [Bern04] Bernhard, F. (2004). *Technische Temperaturmessung*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- [Blie05] Bliedtner, J., & Beez, H. (2005). *Lasermaterialbearbeitung*. FH-Jena: Modul Lasermaterialbearbeitung.
- [Blie08] Bliedtner, J., & Gräfe, G. (2008). *Optiktechnologie*. München: Carl Hanser Verlag.
- [Böge07] Böge, A. (2007). *Handbuch Maschinenbau*. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag.
- [Budz07] Budzier, H., Krause, V., Gerlach, G., & Wassiliew, D. (2007). MWIR-Wärmebildkamera mit Mikrobolometer. *tm - Technisches Messen*, 75 (9), pp. 450-455.
- [CZiM08] Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH. (2008). Oberflächenparameter. Oberkochen.
- [Chen09] Chen, S., Cao, W., Zhang, F., Wu, K., Yang, Y., Chan, Y., et al. (2009). : PANDAT Software with PanEngine, PanOptimizer and PanPrecipitation for Materials Property Simulation of Multi-Component Systems. *Calphad* (33), S. 328-342.
- [DMG09] DMG-GmbH. (2009). Ultrasonic-Baureihe - Datenblätter. *DMG Vertriebs- und Service GmbH*.

- [Eich06] Eichler, J., & Eichler, H. (2006). *Laser – Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [Engl05] Engler, S. (2005). *Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von hochreinen Kiesel-glastiegeln*. TU Clausthal: Dissertationsschrift.
- [FHJe10] Fachhochschule Jena. (2010). „Leitfähig laseraktivierbare Polymerverbunde mit Kohlenstoffnanoröhren für dreidimensionale gehäuseintegrierte Anwendungen“. *CarboAktiv*. Jena.
- [Fand85] Fanderlik, I. (1985). *Křemenné sklo a jeho využití v praxi (dt.: Quarzglas und seine Nutzung in der Praxis)*. Prag: SNTL-Nakladatelství technické literatury (dt.: Der Verlag der technischen Literatur).
- [ILT07] Fraunhofer ILT. (2007). Polar - Polishing with Laser Radiation. *Forschungsbericht*. www.laser-polieren.de.
- [Geot91] Geotti-Bianchini, F., De Riu, L., Gagliardi, G., Guglielmi, M., & Pantano, C. (1991). New Interpretation of the IR reflectance spectra of SiO₂-rich films on soda-lime glass. *Glastechn. Berichte*, S. 205-217.
- [Glüc92] Glückert, U. (1992). *Erfassung und Messung von Wärmestrahlung*. München: Franzis Verlag.
- [Hamb01] Hambrücker, S. (2001). *Technologie der Politur sphärischer Optiken mit Hilfe der Synchrospeed Kinematik*. Berlin: Shaker-Verlag.
- [Hatr09] Harten, U. (2009). *Physik - Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Berlin: Springer Verlag.
- [Hech11] Hecht, K., Bliedtner, J., Haupt, C., & Rost, M. (2011). Abschlussbericht des Teilprojektes im zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) - Fördermodul Kooperations-

- projekte. *Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zum Laserstrahlpolieren von strukturierten Quarzglasoberflächen für den Einsatz in Spritzgussformen*. Fachhochschule Jena.
- [Helm05] Helmut Fischer GmbH+Co.KG. (2005). *Zukunftsweisende Technologie in der Mikrohärtebestimmung*. Sindelfingen.
- [Henn97] Henning, T., & Mutschke, H. (1997). Low-Temperature infrared properties of cosmic dust analogues. (E. Sciences, Hrsg.) *Astronomy & Astrophysics*, S. 743-754.
- [Hera10] Heraeus. (2010). OM 100, Base Materials. Kleinostheim: Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG.
- [Hera09] Heraeus. (2009). Quartz Glass Plates, Base Materials. Kleinostheim: Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG.
- [Hild10] Hildebrand, J. (2010). *Experimentelle und numerische Analyse laserstrahlgeschweißter Elemente aus Quarzglas*. Weimar.
- [Hild11] Hildebrand, J., Hecht, K., Bliedtner, J., & Müller, H. (2011). Laser beam polishing of quartz glass surfaces. (Elsevier, Hrsg.) *Physics Procedia*.
- [Hill05] Hill, T., & Lewick, P. (2005). *Statistics - Methods and Applications*. StatSoft, Inc.
- [Hüge92] Hügel, H. (1992). *Strahlwerkzeug Laser - Eine Einführung*. Stuttgart: Teubner-Studienbücher.
- [Hüls08] Hülsenberg, D., Harnisch, A., & Bismarck, A. (2008). *Microstructuring of Glasses*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.
- [Inst08] Institut für Raumfahrtssysteme. (März 2008). Berührungslose Verfahren - Pyrometrie. www.irs.uni-stuttgart.de.

- [Kama08] Kamann, J. (2008). *Entwicklung und Aufbau eines Laserleistungsregelsystems für temperaturgeführte Materialbearbeitungsprozesse*. Jena: Diplomarbeit.
- [Kess07] Kessler, W. (2007). *Multivariate Datenanalyse in der Bio- und Prozessanalytik*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH.
- [Klep08] Kleppmann, W. (2008). *Taschenbuch Versuchsplanung*. München: Carl Hanser Verlag.
- [Kloc06] Klocke, F., & König, W. (2006). *Fertigungsverfahren 4: Umformen*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- [Kotz09] Kotzott, D. (2009). Dissertation. *Synthese und Charakterisierung von neuen und bekannten Hartstoffen und die technische Relevanz von Härteangaben- Einkristallzüchtung und Darstellung von Sinterkörpern* - . ALBERT – LUDWIG – UNIVERSITÄT, Breisgau.
- [LZH05] Laser Zentrum Hannover. (2005). InProGlas - Innovatives Produktionsverfahren zur Politur von Glasoberflächen. *Forschungsbericht* .
- [Leic08] Leica Microsystems. (2008). *Leica DVM - 3D Visualisierung*. Heerburgg (Schweiz).
- [Mich08] Michaeli, W., & Wolters, L. (2008). *Technologie der Kunststoffe*. München: Carl Hanaser Verlag.
- [Mitu08] Mitutoyo Messgeräte GmbH. (2008). *Optik-Glossar*. Neuss.
- [Naum10] Naumann, C. (April 2010). Quarzglas - Transmission/Reflexion, Temperaturmessung, Verdampfen. Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG.
- [Nöll97] Nölle, G. (1997). *Technik der Glasherstellung*. Stuttgart: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie.
- [Popr05] Poprawe, R. (2005). *Lasertechnik für die Fertigung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [Prom00] PROMETEC. (2000). Betriebsanleitung Lasermeter/Laserstop. PROMETEC GmbH .

- [Prom98] PROMETEC. (1998). Betriebsanleitung Laserscope UFF 100. *PROMETEC GmbH*.
- [Reic89] Reichelt, G., Gräfe, G., & Kuß, H. (1989). *Feinoptiker – Teil 3*. Berlin: Verl. Technik.
- [Rich10] Richmann, A. (November 2010). Bericht über Projekt PoliLas des Fraunhofer ILT. *Polieren optischer Präzisionsoberflächen*. Aachen.
- [ROFI10] ROFIN-SINAR. (2010). Rofin DC-Serie. *ROFIN-SINAR Laser GmbH*.
- [Salm07] Salmang, H., & Scholze, H. (2007). *Keramik*. Berlin: Srpinger Verlag.
- [SASI09] SAS-Institute-Inc. (2009). JMP 8 - Users Guide.
- [Schm10] Schmid-Fetzer, R. (2010). *Korrespondenz*. Technische Universität Clausthal.
- [Schm09] Schmidt, T. (2009). Diplomarbeit. *Aufbau einer CO₂-Laserbearbeitungsanlage zum Fügen und Trennen*. Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung Jena, Fachhochschule Jena.
- [Scho88] Scholze, H. (1988). *Glas*. Berlin: Springer-Verlag.
- [Sico09] Sico. (2009). Datenblatt Quarzglastypen. Bleiberg, Österreich: Sico Technology GmbH.
- [Stau98] Staupendahl, G. (1998). *Grundlagen der Lasertechnik – Lehrbrief 1 bis 7*. Jena: Lehrunterlagen.
- [Stru09] Struve, B. (2009). *Einführung in die Lasertechnik*. Berlin: VDE Verlag.
- [TRUM06] TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG. (2006). *Laserbeschriften*. Ditzingen.
- [Unge10] Unger, S. (März 2010). Pyrometrie bei der Preformherstellung. IPHT Jena.
- [Voge92] Vogel, W. (1992). *Glaschemie*. Berlin: Springer-Verlag.
- [Vogt02] Vogt, B. (2002). Ultrasonic-Technologie revolutioniert die Bearbeitung hartspröder Werkstoffe. *Industrie Diamanten Rundschau*, 6-10.

- [Volk05] Volk, R. (2005). *Rauheitsmessung - Theorie und Praxis*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [Wirt04] Wirth, P. (2004). *Einführung in die industrielle Lasermaterialbearbeitung*. Hamburg: ROFIN SINAR GmbH.
- [Zolt70] Zolotarev, V. (1970). Optical constants of amorphous SiO₂ and GeO₂ in the region of valence band. *Optika Spektrosc.*, S. 66-70.

10.2 Betreute Arbeiten

- [jena01] Baumann, R. (2011). Masterarbeit. *Entwicklung einer Bestrahlungsstrategie zur abstandsunabhängigen Politur von Quarzglasbauteilen*. Fachhochschule Jena; Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH.
- [jena02] Haupt, C. (2009). Bachelorarbeit. *Entwicklung, Konstruktion und Aufbau eines piezogetriebenen Laserstrahlableitsystems*. Fachhochschule Jena.
- [jena04] Kupfer, D. (2009). Bachelorarbeit. *Pyrometrische Untersuchungen zum Laserstrahlpolieren von Glasoberflächen*. Fachhochschule Jena.
- [jena05] Rost, M. (2009). Bachelorarbeit. *Untersuchungen zur Anwendung von diamantgebundenen Abtragsverfahren zur Bearbeitung von Quarzglasoberflächen*. Fachhochschule Jena.
- [jena06] Steinbauer, C. (2009). Bachelorarbeit. *Untersuchungen zur Prozessoptimierung beim Laserstrahlpolieren*. Fachhochschule Jena; Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH.

11 Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 3-1:	Vereinfachte Darstellung der Transmission und Reflexion von Quarzglas	21
Abb. 3-2:	Modell der Normalschwingungen des CO ₂ -Moleküls [Baue91]	22
Abb. 3-3:	vereinfachtes Modell des 4-Niveausystems des Kohlendioxidlasers	23
Abb. 3-4:	Langsam längsgeströmter CO ₂ -Laser; a) Schema [Baue91], b) Foto	24
Abb. 3-5:	Schema eines CO ₂ -Slab-Lasers [ROFI10]	26
Abb. 3-6:	Rohstrahlprofil des SM1500P bei 100% Leistung ..	28
Abb. 3-7:	Schema zur Ausbreitung eines Laserstrahls	28
Abb. 3-8:	Ausbreitung des Laserstrahls nach der Fokussieroptik (Schema)	30
Abb. 3-9:	Strahlkaustik des SM1500P nach Scanneroptik	31
Abb. 3-10:	Thermische Vorgänge am laserbestrahlten Quarzglas	35
Abb. 3-11:	Struktur und Bindung des [SiO ₄] ⁴⁻ -Tetraeders	38
Abb. 3-12:	Transmissionskurven von HSQ300	40
Abb. 3-13:	Oberfläche nach Lappen mit Materialanteilskurve nach [Blie08]	49
Abb. 3-14:	Wirkung fokussierter und defokussierter Laserstrahlung auf das Quarzglas	52
Abb. 3-15:	Laserstrahlpolierprozess a) Schema Versuchsanordnung b) Probe während der LSP	52
Abb. 3-16:	2D & 3D-Darstellung des Strahlprofils (Laser SM1500P) bei P = 620 W; z = +100 mm	54
Abb. 3-17:	Simulierte Temperaturänderung (zeitabhängig) in festem Messpunkt auf Probenoberflächenmitte für verschiedene v _f und 3D-Darstellung des Temperaturfeldes [Hild11]	56

Abb. 3-18:	Auswirkung unterschiedlicher v_f auf die Vergleichsspannung von Mises 1000 s nach Politurbeginn [Hild11]	56
Abb. 3-19:	Kühlkurve der laserstrahlpolierten Quarzglasproben	58
Abb. 3-20:	Berechnete Viskosität des HSQ300 in Abhängigkeit von der Temperatur.....	60
Abb. 3-21:	Phasendiagramm O-Si nach [Schm10]	61
Abb. 3-22:	Dampfdruck von SiO_2 nach [Schm10]	62
Abb. 4-1:	Aufbau der CO_2 -Laseranlage mit Galvo-Scannersystem	66
Abb. 4-2:	Skizzen zur Berechnung des Grades der Überlagerung ÜG	69
Abb. 4-3:	Einfluss Defokussierung auf Laserstrahlpolitur a) Rauheit, b) Materialabtrag.....	72
Abb. 4-4:	Modell des Piezoscanners [jena02].....	76
Abb. 4-5:	FEM-Analyse der Kopfplatte (Spannungen/Verschiebung) [jena02]	77
Abb. 4-6:	Neu entwickelter Piezoscanner [jena02]	78
Abb. 4-7:	Einsatz des neuentwickelten Piezoscanners an der Anlage des DC020 Lasers	79
Abb. 5-1:	Prozesskette der Laserstrahlpolitur	80
Abb. 5-2:	a) Umfangs-Planschleifen b) gekittete Proben [jena05]	85
Abb. 5-3:	Umfangs-Planschleifen - Effektdiagramm für den Oberflächenkennwert R_a [jena05]	87
Abb. 5-4:	Wechselwirkungsdiagramme auf den Rauheitswert R_a für a) $a_e * v_f$ und b) $a_p * a_e$	87
Abb. 5-5:	Rauheit R_a der Proben aus den Versuchsreihen zum Umfangs-Planschleifen.....	88
Abb. 5-6:	Welligkeit W_a der Proben aus den Versuchsreihen zum Umfangs-Planschleifen	89

Abb. 5-7:	CNC-Form-Profilschleifen - Effektdiagramm für den Oberflächenkennwert Ra [jena05]	91
Abb. 5-8:	Wechselwirkungsdiagramm für $n_g * a_c$ auf den Rauheitswert Ra	91
Abb. 5-9:	Rauheit und Welligkeit der Proben aus den Versuchsreihen zum Form-Profilschleifen	92
Abb. 5-10:	Rauheit und Welligkeit der Proben aus den Versuchsreihen zum ultraschallunterstützten Form-Profilschleifen	94
Abb. 5-11:	Modell der 2½D Kontur	96
Abb. 5-12:	Ermittelter Emissionsgrad für HSQ300	99
Abb. 5-13:	Schema der Positionierung Pyrometer : Laser (Maßstab 1,4 : 7,1)	102
Abb. 5-14:	Temperaturverlauf im/um Wechselwirkungsbereich Quarzglasoberfläche-Laser	102
Abb. 5-15:	Ergebnis Konzept a)	103
Abb. 5-16:	Messfleck im Laserspot a) Verlaufs- und b) Maximaltemperatur bei variabler Leistung	105
Abb. 5-17:	Messfleck im Laserspot - Maximaltemperatur bei variablem Vorschub	106
Abb. 5-18:	Residuum über Vorhersagewert Ra	111
Abb. 5-19:	Mess- über Vorhersagewerte Ra in Gruppe B und C	111
Abb. 5-20:	Darstellung der Signifikanz der Prozessparameter auf Zielgrößen in Gruppe A	114
Abb. 5-21:	Darstellung der Signifikanz der Prozessparameter auf Zielgrößen in Gruppe B und C	115
Abb. 5-22:	Ra und MA in Abhängigkeit der von Temperatur für Gruppe A	116
Abb. 5-23:	Ra und MA in Abhängigkeit der von Temperatur für Gruppe B	117

Abb. 5-24:	Ra und MA in Abhängigkeit der Temperatur für Gruppe C	118
Abb. 5-25:	Mess- über Vorhersagewerte Rq und T in Gruppe C (2)	120
Abb. 5-26:	Darstellung der Signifikanz der Prozessparameter auf Zielgrößen in Gruppe C (2).....	121
Abb. 5-27:	Mess- über Vorhersagewerte Wq in Gruppe C (2)	122
Abb. 5-28:	Rq und MA in Abhängigkeit von der Temperatur für Gruppe C (2).....	123
Abb. 5-29:	Rq und MA in Abhängigkeit von der Temperatur für Gruppe C (2) - Detail	123
Abb. 5-30:	Ra, MA und T in Abhängigkeit der Leistung bei variierendem Vorschub	125
Abb. 6-1:	Struktur „Orangenhaut“	129
Abb. 6-2:	Oberflächendarstellung (Welligkeit) aus 3D-Tastschnittmessung	130
Abb. 6-3:	Beispiele von DIK-Aufnahmen unterschiedlich bearbeiteter Quarzglasoberflächen.....	132
Abb. 6-4:	Oberfläche im DIK (x50) in Abhängigkeit der Temperatur	134
Abb. 6-5:	a) 2 und 3D-AFM-Bilder von laserpolierten C-Proben; b) Vergleich der PSD-Funktionen	135
Abb. 6-6:	REM-Aufnahmen verschieden bearbeiteter Quarzglasoberflächen	137
Abb. 6-7:	Spannungszustand nach der Laserstrahlpolitur in unterschiedlich großen Proben.....	143
Abb. 6-8:	Spannungsrisse in laserstrahlpolierten Proben	143
Abb. 6-9:	Vergleichender Härteverlauf mechan. und laserstrahlpolierter Quarzglasproben.....	147
Abb. 6-10:	Härtevergleich – mechanische Politur vs. LSP (mepo vs. lapo).....	147
Abb. 6-11:	Biegefestigkeit unpolierter und laserstrahlpolierter Quarzglasproben.....	149

Abb. 6-12:	Temperaturmessung mit Pyrometer und Wärmebildkamera bei der LSP am SM1500P (Anlage des Günter-Köhler-Instituts für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH).....	152
Abb. 6-13:	Thermografische Bildfolge - LSP auf Probe C331 und C343 (variierte Prozessparameter)	154
Abb. 6-14:	a) Vergleich der durch Pyrometer und TCam gemessenen Temperaturverläufe auf C331 b) Darstellung der Messbereiche; c) Temperaturprofil der „Polierlinie“ (quer)	156
Abb. 6-15:	Vergleich der durch Pyrometer und TCam gemessenen Temperaturverläufe auf C343.....	157
Abb. 6-16:	Auswirkung der Polierunterlage und Absaugung auf den Temperaturverlauf (gleit. Ø (10))	159
Abb. 6-17:	Auswirkung von Polierunterlage und Absaugung auf die Temperaturverteilung	160
Abb. 6-18:	Auswirkung unterschiedlicher Probendicke auf Temperatur	161
Abb. 6-19:	Temperatur ohne und mit Laserleistungsregelung	163
Abb. 7-1:	Prozessmodell - Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen.....	165
Abb. 8-1:	Linsenarray und Scheifwerkzeug (Achse unter 180° zur Oberfläche).....	169
Abb. 8-2:	Linse aus Linsenarray a) nach dem Schleifen; b) nach der Laserstrahlpolitur	169
Abb. 8-3:	Zeichnung des Stufenteils	172
Abb. 8-4:	Prozesskette zur Fertigung eines Formeinsatzes aus Quarzglas für ein Spritzgusswerkzeug (SG-WZ) mit anschließendem Spritzgießen	173
Abb. 8-5:	Thermografie- und Realbild des Werkzeugformeinsatzes während der Laserstrahlpolitur.....	174

Abb. 8-6:	Spritzgusswerkzeug (SG-WZ) mit Quarzglasformeinsatz und abgeformtes Stufenteil	176
Abb. 8-7:	a) Rauheitswerte der Proben vor und nach der Politur mittels Piezo-Scanner b) Real- und Thermografiebild der Probe C271-2 während der LSP mittels Piezo-Scanner.....	178
Abb. 8-8:	3D-Tastschnittmessung einer mech. polierten und anschließend laserpolierten Probe.....	179
Abb. 8-9:	Prisma P11	180
Abb. 8-10:	Gefiltertes Rauheitsprofil des laserstrahlpolierten Prismas P11	180

12 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3-1:	Technische Daten der Laser (Datenblätter)	27
Tabelle 3-2:	Daten der Laser aus Strahlanalyse	31
Tabelle 3-3:	Ausgewählte Eigenschaften von HSQ300 [Hera09]	39
Tabelle 3-4:	Daten der Wärmebildkamera SC655 und des Pyrometers IE 120/51-L	46
Tabelle 3-5:	Ausgangs- und Randbedingungen für LSP- Simulation	53
Tabelle 3-6:	Analyse des Strahlprofils	55
Tabelle 4-1:	Übersicht der möglichen Scankonzepte	68
Tabelle 4-2:	Relevante Laserstrahlparameter	71
Tabelle 4-3:	Übersicht der Komponenten und Funktionen des Piezoscanners [jena02]	75
Tabelle 5-1:	Rauheitsklassen nach DIN EN 1302	82
Tabelle 5-2:	Übersicht der Faktoren/Zielgrößen für das Schleifen der Quarzglasproben	84
Tabelle 5-3:	Auflistung der Versuchsparameter für Umfangs- Planschleifen	86
Tabelle 5-4:	Auflistung der Versuchsparameter für das konventionelle CNC Form-Profilschleifen	90
Tabelle 5-5:	Auflistung der Versuchsparameter für das ultraschallunterstützte Form-Profilschleifen	93
Tabelle 5-6:	Vergleich der Schleif-Bearbeitungsverfahren und ihre Ergebnisse	95
Tabelle 5-7:	Auflistung der Versuchsparameter für die Fertigung der 2 ½ D Kontur	96
Tabelle 5-8:	Vergleichende Betrachtung der Kanten der geschliffenen 2 ½ D Konturen [jena05]	98
Tabelle 5-9:	Konzepte der Temperaturerfassung	101
Tabelle 5-10:	Parametergrenzen eines Versuchsplanes für das Laserstrahlpolieren	108
Tabelle 5-11:	Ausschnitt aus Versuchsplan 1, Gr. C	108

Tabelle 6-1:	Übersicht – Reduzierung der Rauheit in Abhängigkeit v. Temperatur u. Materialabtrag	128
Tabelle 6-2:	In AFM-Untersuchung ermittelte Oberflächenkenngrößen	136
Tabelle 6-3:	Einfluss verschiedener Reinigungszustände auf die Oberflächenqualität	139
Tabelle 6-4:	Optische Weglängendifferenz (OPD) unterschiedlicher laserstrahlpolierter Proben	145
Tabelle 8-1:	Rauheitswerte des Formeinsatzes nach Schleifen und LSP	171
Tabelle 8-2:	Parameter des Piezo-Scanners und deren Überführung in bekannte LSP-Parameter	177

Danksagung

Diese Arbeit ist während meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Fachhochschule Jena im Fachbereich SciTec in der Arbeitsgruppe Fertigungs-technik/-automatisierung in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Ilmenau entstanden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Jens Bliedtner für die Anregungen zu dieser Arbeit, die fachliche Betreuung, die Bereitstellung der Laser-, Fertigungs- und Messtechnik und nicht zuletzt für wertvolle Diskussionen, Kritiken und Anregungen, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

In gleicher Weise hat mich auch Frau Prof. Dr. Dr. Dagmar Hülseberg von der Technischen Universität Ilmenau unterstützt. Ihre zahlreichen Ratschläge und Hinweise zur Differenzierung der Aufgabenstellung und ihre kritischen Anregungen zu den in der Arbeit diskutierten Inhalten waren ebenfalls ein wichtiger Schritt zum erfolgreichen Verfassen der Dissertationsschrift.

Herrn Dr. Hartmut Müller, Leiter der Abteilung Lasertechnik am Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung in Jena, danke ich für die Bereitstellung des Lasers am Institut und des Quarzglasmaterials sowie für zahlreiche Fachgespräche zur Lasertechnik und der Lasermaterialbearbeitung von Glaswerkstoffen. Herr Dipl.-Ing.(FH) Thomas Schmidt, Mitarbeiter von Herrn Dr. Müller, hat mir bei der gemeinsamen Arbeit an der Laseranlage in den zahlreichen Experiment tatkräftig zur Seite gestanden.

Den Mitarbeitern des Fachbereiches SciTec an der Fachhochschule Jena danke ich für die Unterstützung bei der Fertigung der Scannerkomponenten und der Spritzgussform sowie bei der Probenvorbereitung und bei den Analysen der Probenoberflächen.

Mein herzlichster Dank gilt meinen Freunden und meiner Familie für die unermüdliche und tatkräftige Unterstützung während der gesamten Promotionszeit.

